



Lassi Aaltonen

Kamerajärjestelmän liittäminen mobiilikartoitusjärjestelmään

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Jyväskylässä 25.11.2018

Valvoja: Professori Matti Vaaja

Ohjaaja: TkT Petri Rönnholm

Tekijä Lassi Aaltonen

Työn nimi Kamerajärjestelmän liittäminen mobiilikartoitusjärjestelmään

Koulutusohjelma Geoinformatics

Työn valvoja Professori Matti Vaaja

Työn ohjaaja(t) TkT Petri Rönnholm

Päivämäärä 25.11.2018

Sivumäärä 72+45

Kieli suomi

Tiivistelmä

Mobiilikartoitusjärjestelmät tarjoavat nopean ja kustannustehokkaan tavan ympäristön mallintamiseen georeferoitujen kuvien ja LiDAR-perusteisen 3D-pistepilven avulla. Mobiilikartoitusjärjestelmä koostuu useista paikannus- ja kartoitussensoreista. Eri sensoreiden keräämien aineistojen yhteen liittämiseksi vaaditaan tarkka järjestelmäkalibrointi.

Tässä työssä perehdyttiin mobiilikartoitusjärjestelmän järjestelmäkalibrointiin erityisesti fotogrammetrian näkökulmasta. Työn kokeellisessa osassa kamera liitettiin osaksi veneeseen asennettua mobiilikartoitusjärjestelmää, johon oli asennettu valmiiksi kaksi GNSS-antennia, inertiajärjestelmä, laserkeilain ja monikeilainkaikuluotain. Tavoitteena oli kuva- ja laserkeilausaineistojen mahdollisimman hyvä yhteensovittaminen laserpistepilven väritymistä ja 3D-mallin teksturointia varten.

Tärkeimpänä mallinnusympäristönä toimi Jyväskylässä sijaitseva Kuokkalan sillan lähi-alueet. Kuvien ja laserpistepilven yhteensovituksessa saavutettiin 3,5 cm sijaintitarkkuus kohdekoordinaatistossa ja 3,0 pikselin tarkkuus kuvatasolla. LiDAR-perusteisen 3D-mallin teksturointi hyödyntäen veneestä otettua georeferoitua kuva-aineistoa osoittautui käyttökelpoiseksi etenkin tasomaisten, pystysuuntaisten kohteiden osalta.

Avainsanat mobiilikartoitusjärjestelmä, GNSS, INS, kamera, fotogrammetria, laserkeilaus, kameran kalibrointi, järjestelmäkalibrointi, aikasyntronointi

Author Lassi Aaltonen

Title of thesis Integrating camera system into mobile mapping system

Degree programme Geoinformatics

Thesis supervisor Professor Matti Vaaja

Thesis advisor(s) D.Sc. (Tech.) Petri Rönholm

Date 25.11.2018

Number of pages 72+45

Language Finnish

Abstract

Mobile mapping systems offer fast and cost-effective method to model environment with georeferenced images and LiDAR-based 3D point clouds. A mobile mapping system contains multiple different navigation and mapping sensors. An accurate system calibration is required to align the data acquired by different sensors.

In this work, system calibration of the mobile mapping system was investigated especially from the photogrammetric point of view. A camera was integrated into the boat-based mobile mapping system which consists of two GNSS-antennas, inertial navigation system, laser scanner and multibeam echosounder. The study aimed to align imaging and laser scanning data in a appropriate way for point cloud colorization and texturing of the 3D model.

The most important modelling environment was Kuokkala bridge and its neighbouring area located in Jyväskylä. Geometric accuracy of 3,5 cm in the object coordinate system and pixel accuracy of 3,0 pixels on the image plane were achieved in the alignment of the images and laser point cloud. Texturing of the LiDAR-based 3D model utilizing georeferenced imaging data from the boat turned out to be usable especially for planar, vertical objects.

Keywords Mobile mapping system, GNSS, INS, camera, photogrammetry, laser scanning, camera calibration, system calibration, time synchronization

Alkusanat

VRT Finland Oy:lle kiitokset erittäin mielenkiintoisesta diplomityön aiheesta, työn rahoituksesta ja rennosta työskentelyilmapiiristä. Erityiskiitokset Matti Savolaiselle monipuolisesta avusta varsinkin diplomityön kokeellisen osuuden asioissa. Työn ohjaajana toimi TkT Petri Rönholm, jota haluan kiittää hyödyllisistä neuvoista ja hyvästä ohjauksesta läpi työn. Työn valvojalle Matti Vaajalle kiitokset työn läpi käymisestä ja kommentista. Kiitokset myös Jyväskylän Maanmittauslaitokselle GNSS- ja takymetrikaluston lainaamisesta testikentän rakentamista varten.

Lopuksi haluan osoittaa kiitollisuuteni perheelleni ja ystäville, joiden tuesta on ollut suuri apu opintojen aikana.

Jyväskylä 25.11.2018

Lassi Aaltonen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Mobiilikartoitusjärjestelmät	3
2.1	Paikannusjärjestelmä	4
2.2	Kartoitussensorit	5
3	Järjestelmäkalibrointi	7
3.1	Kameran kalibrointi	7
3.1.1	Perspektiivinen kameramalli	8
3.1.2	Itsekalibroituva sädekimpputasoitus	12
3.2	Alustakalibrointi	15
3.2.1	Kaksivaiheinen menetelmä	17
3.2.2	Yksivaiheinen menetelmä	19
3.3	Aikasykronointi	22
4	Kuvien ja laserkeilausaineiston yhdistäminen	24
4.1	Kuvien yhteensovitus SfM-menetelmällä	24
4.2	3D-3D-rekisteröinti vastinpisteiden avulla	26
5	Kameran liittäminen mobiilikartoitusjärjestelmään	28
5.1	Käytetty laitteisto	28
5.2	Järjestelmäkalibroinnin toteutus	32
5.2.1	Kameran kalibrointi	32
5.2.2	Alustakalibrointi	34
5.2.3	Karkea aikasykronointi	36
5.2.4	Kuvien georeferointi alustakalibroinnin ratkaisun perusteella	37
5.3	Tutkimuskohteet ja tutkimusmenetelmät	39
5.3.1	Tiiliseinä-testikenttä	40
5.3.2	Kuokkalan silta	42
6	Tulokset	50
6.1	Järjestelmäkalibroinnin tulokset	50
6.2	Kuvien georeferoinnin ja kohteiden kartoituksen tarkkuus	54
6.3	Kuvien ja laserpistepilven yhteensovittamisen tarkkuus	54
6.4	Laserpistepilven värjääminen ja 3D-mallin teksturointi	57
7	Pohdinta	59
8	Johtopäätökset	62
	Lähdeluettelo	65
	Liiteluettelo	72

Lyhenteet

ANN	Approximate Nearest Neighbour
DGNSS	Differential GNSS
DMI	Distance Measurement Instrument
GAMS	GPS Azimuth Measurement Subsystem
GLONASS	Globalnaja navigatsionnaja sputnikovaja sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground Sampling Distance
ICP	Iterative Closest Point
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
ISO	Integrated Sensor Orientation (alustakalibroinnin yhteydessä)
ISO	International Organization for Standardization (kameroiden yhteydessä); ISO-arvo kuvaa kameran valoherkkyyttä
LiDAR	Light Detection And Ranging
NMEA	National Marine Electronics Association
PCS	POS Computer System
PNS	Pienimmän neliösumman menetelmä
POS	Positioning and Orientation System
PPK	Post Processing Kinematic
PPS	Pulse Per Second
RANSAC	Random Sample Consensus
RGB	Red, Green, Blue
RMS	Root Mean Square
ROC	Relative Orientation Constraints
RTK	Real Time Kinematic
SfM	Structure from Motion
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UCT	Coordinated Universal Time
WGS84	World Geodetic System 1984

1 Johdanto

Mobiilikartoitusjärjestelmät ovat viimeisen vuosikymmenen aikana kehittyneet akateemisista tutkimuksista kaupallisiksi järjestelmiksi (Toschi et al. 2015). Niiden kehitystyötä on vauhdittanut tutkijoiden, insinöörien ja suunnittelijoiden lisääntynyt tarve hankkia kolmiulotteista ympäristötietoa nopealla ja kustannustehokkaalla tavalla (Barber et al. 2008; El-Sheimy & Hassan 2007; Sairam et al. 2016). Perinteisesti ympäristötietoa on kerätty kenttätyönä tehtävin takymetrimittauksin. Myös staattinen laserkeilaus on osoittautunut kelvolliseksi menetelmäksi esimerkiksi rakenteiden kartoittamisessa tai arkkitehtuurisissa sovelluksissa (Barber et al., 2006; Mills & Barber, 2004). Tyypillisesti näiden menetelmien ongelmana on tarve GNSS-mittauksin toteutetulle kiintopisteverkolle, mikä tekee menetelmien soveltamisesta laajoille alueille työlästä ja aikaa vievää. (Barber et al. 2008; Sairam et al. 2016) Mobiilikartoituksella voidaan kerätä suoraan hyödynnettävää 3D-informaatiota ajoneuvon lähiympäristöstä. (Sairam et al. 2016) Mobiilikartoitusjärjestelmät kiinnitetään tyypillisesti henkilö- tai pakettiautoon, mutta vaihtoehtoisia alustoja ovat muun muassa miehittämättömät ilma-alukset (UAV) (Eisenbeiß 2009; Remondino et al. 2011), veneet (Alho et al. 2009; Burdziakowski et al. 2015; Michoud et al. 2014; Vaaja et al. 2013) ja jopa selkäreput (Kukko et al. 2012).

Viimeisen vuosikymmenen aikana etenkin LiDAR-perusteisten mobiilikartoitusjärjestelmien suosio on kasvanut merkittävästi, koska ne tarjoavat parhaan ja kustannustehokkaimman ratkaisun urbaanien alueiden mallintamiseen kolmiulotteisena pistepilvenä. Menetelmän vahvuuksia ovat pistepilven hyvä geometrinen tarkkuus, korkea pistetiheys ja mahdollisuus suorittaa kartoitus suoraan liikkuvalla alustalla. (Burkhard et al 2012; Toschi et al. 2015) Nykyään myös pelkkiä kameroita kartoitussensoreinaan käyttävillä kameramobiilikartoitusjärjestelmillä on saavutettu lähes LiDAR-perusteisten järjestelmien kaltaisia tuloksia (Burkhard et al. 2012; Cavegn et al. 2015; Blaser et al. 2017).

Mobiilikartoitusjärjestelmien jatkuvan kehityksen myötä mobiilikartoituksen hyödyntäminen lisääntyy jatkuvasti monilla eri sovellusalueilla. Findley et al. (2011) käsittelee tutkimuksessaan siirtymistä manuaalisista mittausmenetelmistä mobiilikartoitukseen vertaillen menetelmien välisiä mittaustarkkuuksia. Erityisesti mobiilikartoituksen soveltuvuutta tiealueiden infrastruktuurin kartoittamiseen on käsitelty runsaasti eri tutkimuksissa (Pu et al. 2011; Tsai & Han 2013; Williams et al. 2013; Zhou et al. 2013). Muita mobiilikartoitusjärjestelmien käyttökohteita ovat muun muassa yhdyskunta- ja rakennustekniikka (Slattery et al. 2012), urbaanien alueiden mallintaminen (Deshpande 2013), putkilinjojen suunnittelu (Kawashima et al. 2012), kulttuuriperinnön mallintaminen (Ziparo et al. 2013) ja metsien inventointi (Bauwens et al. 2016; Liang et al. 2016) Viime aikoina on kiinnostuttu myös mobiilikartoitusjärjestelmien kehittämisestä autonomisia ajoneuvoja varten (Guo et al. 2014; Zhuang et al. 2015).

Tässä työssä mobiilikartoitusjärjestelmänä käytetään venettä, johon on asennettu valmiiksi kaksi GNSS-antennia, inertiajärjestelmä, laserkeilain ja monikeilainkaikuluotain. Nykyiseen järjestelmään liitetään uutena komponenttina kamera, jonka tarkoitus on parantaa veden äärellä olevien maanpäällisten kohteiden (esim. sillat, voimalaitokset, satamarakenteet ja muu rakennettu ympäristö) visualisointia yksiväriseen tai intensiteettiarvoihin perustuvaan laserpistepilven verrattuna. Georeferoiduista kuvista saatavaa informaatiota voidaan hyödyntää

värjäämällä laserkeilaimella tuotettu pistepilvi tosivärein tai luomalla kuvien avulla tekstuurit kuva- tai laserpistepilven perusteella luodulle 3D-mallille, mikä helpottaa kartoitettujen kohteiden tulkintaa ja paikantamista.

Työssä pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Mitä toimenpiteitä sisältyy kamerajärjestelmän liittämiseksi osaksi mobiilikartoitusjärjestelmää?
2. Mitkä ovat kriittisimmät tekijät järjestelmäkalibroinnin ja kohteiden kartoituksen kannalta?
3. Kuinka tarkasti kuvien georeferointi ja kohteiden fotogrammetrinen kartoitus onnistuvat?
4. Kuinka tarkasti laserkeilaimella tuotetun pistepilven väriarvot voidaan määrittää georeferoiduista kuvista?

Työn tavoitteena on löytää mahdollisimman hyvä toteuttamiskelpoinen ratkaisu järjestelmäkalibroinnille kuvien ja laserpistepilven yhteensovittamiseksi. Tässä työssä keskitytään pääosin mobiilikartoitusjärjestelmän järjestelmäkalibrointiin fotogrammetrian näkökulmasta. Lisäksi työssä tutkitaan väriarvojen määrittämistä laserkeilaimella tuotetulle pistepilvelle ja kokeillaan tekstuurien luontia laserpisteistä muodostetulle 3D-mallille. Laserkeilaimen ja monikeilainkaikuluotaimen osuutta järjestelmäkalibroinnissa ei käsitellä.

Työ koostuu teoreettisesta ja kokeellisesta osuudesta. Luvussa 2 käsitellään mobiilikartoitusjärjestelmän tyypilliset komponentit ja kerrotaan aiemmissa tutkimuksissa kehitetyistä mobiilikartoitusjärjestelmistä. Luvussa 3 esitetään järjestelmäkalibroinnin osa-alueet ja käydään läpi tarkemmin aiemmissa tutkimuksissa kehitettyjä kalibroitimenetelmiä perspektiivikameroiden osalta. Luvussa 4 kerrotaan kuvien ja laserkeilausaineiston yhteensovittamisesta. Tässä luvussa käsitellään erityisesti Structure from Motion -tekniikkaa, jota hyödynnetään pelkän kuva-aineiston perusteella tapahtuvassa 3D-rekonstruoinnissa. Luvussa 5 siirrytään työn kokeelliseen osuuteen. Siinä kerrotaan työssä käytetystä mobiilikartoitusjärjestelmästä, tutkimuskohteista sekä käytetyistä kalibrointi- ja tutkimusmenetelmistä. Luvuissa 6 ja 7 käsitellään työn tulokset. Viimeisessä luvussa esitetään johtopäätökset.

2 Mobiilikartoitusjärjestelmät

Useat tutkimusryhmät ovat kehittäneet mobiilikartoitusjärjestelmiä 1990-luvulta lähtien. Mobiilikartoitusjärjestelmä on kiinteä, liikkuva alusta, joka koostuu paikannus- ja kartoitus-sensoreista sekä hallintayksiköstä, jonka tehtävänä on tallentaa ja synkronoida kaikkien järjestelmän komponenttien keräämä aineisto. Paikannussensoreina käytetään yleensä GNSS-vastaanottimia ja inertiajärjestelmää (INS), kartoitussensoreina puolestaan yhtä tai useampaa laserkeilainta ja kamerajärjestelmää (Madeira et al. 2012; Puente et al. 2013)

Alun perin 3D-mobiilikartoitusjärjestelmien kartoitussensoreina käytettiin pelkästään video- tai digikameroita. Ensimmäiset järjestelmät, GPSVanTM (Novak 1991) ja VISAT-System (Schwarz et al. 1993) perustuivat eteenpäin suunnattuun stereokamerajärjestelmään, jossa kameroiden kuvakanta asetettiin vaakatasoon. Myöhemmin kehitetyissä mobiilikartoitusjärjestelmissä on tavoiteltu laajempaa näkökenttää tutkimalla useiden stereokameroiden, kalansilmälinsien ja panoraamakameroiden avulla tapahtuvaa kartoitetun ympäristön 3D-rekonstruointia. Esimerkiksi Google, Microsoft, Baidu ja Tencent ovat hyödyntäneet panoraamakameroita katutasonäkymiä tarjoavissa karttapalveluissaan (Cui et al. 2017). Blaser et al. (2017) tekemästä tutkimuksesta löytyy hyvä kooste viimeaikaisista tutkimuksista, joissa tarkasteltuja menetelmiä voidaan käyttää laajemman näkökentän tavoittelussa. Chen et al. (2012) tutkivat panoraamaisten epipolaarikuvien luontia panoraamakuvapareista. Strecha et al. (2015) vertailivat keskenään kalansilmäkameroilla ja perinteisillä perspektiivisillä kameroilla toteutettujen 3D-rekonstruointien laatua. Tutkimuksessa huomattiin perspektiivikameroiden tuottavan tarkempia tuloksia, mutta olevan epäkäytännöllisempiä kalansilmäkameroihin verrattuna kaupunkien kapeilla kujilla ja erityisesti sisätiloissa. Kronbach et al. (2015) arvioivat tutkimuksessaan erilaisia stereoalgoritmeja esteiden reaaliaikaiseen tunnistamiseen kalansilmälinsien avulla. Schneider et al. (2016) puolestaan sovelsivat perspektiivisille stereokuvapareille yleisesti käytettyä epipolaarigeometriaan perustuvaa mallia kalansilmästereokuvapareille. (Blaser et al. 2017)

Mobiilikartoitukseen soveltuvien laserkeilainten tulo markkinoille 2000-luvun puolivälin tienoilla mahdollisti LiDAR-teknologian hyödyntämisen osana mobiilikartoitusjärjestelmää (Hunter et al. 2006). Mobiililaserkeilauksen hyvä geometrinen tarkkuus ja kerätyn 3D-informaation suora hyödynnettävyys johtivat siihen, että suurin osa nykyään käytetyistä mobiilikartoitusjärjestelmistä perustuvat LiDAR-teknologiaan (Bukhard et al. 2012; Cavegn et al. 2015).

Useissa tutkimuksissa on arvioitu erilaisten LiDAR-perusteisten mobiililaserkeilainjärjestelmien absoluuttisia 3D-pisteiden mittaustarkkuuksia, jotka hyvissä GNSS-olosuhteissa ovat olleet laadukkailla järjestelmillä noin muutaman senttimetrin luokkaa (esim. Barber et al. 2008; Haala et al. 2008; Kremer & Hunter 2007; Kaartinen et al. 2012; Puente et al. 2013). Myös nykyaikaisilla, kartoitussensoreinaan pelkästään kameroita käyttävillä kameramobiilikartoitusjärjestelmillä päästään parhaimmillaan hyvin lähelle LiDAR-perusteisten järjestelmien tarkkuuksia. Burkhard et al. (2012) ja Cavegn et al. (2016) saavuttivat tutkimuksissaan keskimäärin noin 4-5 cm mittaustarkkuuksia mobiilistereokartoitusjärjestelmillä. Myös Blaser et al. (2017) pääsi vastaavanlaiseen tulokseen käyttämällä uudenlaista stereo- ja panoraamakameroista koostuvaa hybridijärjestelmää, joka pyrkii tarjoamaan täyden 360° peitteisyyden keräämälleen kuva-aineistolle.

2.1 Paikannusjärjestelmä

Mobiilikartoitusjärjestelmän paikannusjärjestelmänä käytetään perinteisesti GNSS:n ja inertiajärjestelmän yhdistelmää. (Madeira et al. 2012; Puente et al. 2013) Pyörillä kulkeviin mobiilikartoitusjärjestelmiin on useimmiten asennettu myös matkanmittausjärjestelmä (DMI), joka kerää informaatiota pyörän liikkeistä. (Puente et al. 2013) Lisäksi on tutkittu tyypillisesti kartoitussensorina toimivan kamerajärjestelmän käyttämistä visuaaliseen navigointiin, mikä parantaa suoran georeferoinnin tarkkuutta etenkin huonossa GNSS-ympäristössä (Eugster et al. 2012; Nebiker et al. 2012).

Paikannusjärjestelmän tehtävänä on määrittää ajoneuvon absoluuttisen sijainti ja kiertotasema suhteessa globaaliin koordinaattijärjestelmään (esim. WGS84) ennalta määritetyin aikavälein. Tämä mahdollistaa suoran georeferoinnin eli kartoitussensorien ulkoisten orientointien selvittämisen jokaiselle havaintohetkelle. Suoran georeferoinnin avulla kohteita voidaan kartoittaa ilman koordinaateiltaan tunnettuja kontrollipisteitä. (Tao 2000; Madeira et al. 2012; Puente et al. 2013)

GNSS on yleisesti käytetty järjestelmä absoluuttisen sijainnin määrittämiseen globaalissa koordinaattijärjestelmässä. Sen toiminta perustuu elektronisiin laitteisiin, jotka analysoivat satelliittipaikannusjärjestelmän lähettämiä radiosignaaleja. (Madeira et al. 2012) GNSS-havaintoja voidaan määrittää pääasiassa kolmessa mittaustilassa, jotka ovat epätarkimmasta tarkimpaan differentiaalinen GNSS (DGNSS), reaaliaikainen kinemaattinen (RTK) ja jälkिलaskettu kinemaattinen (PPK) (Puente et al. 2013). Mittaustilan lisäksi GNSS-havaintojen tarkkuus riippuu GNSS-tukiasemien sijainneista, satelliittigeometriasta ja GNSS-lukituksen jatkuvuudesta (Rau et al. 2011). Tällä hetkellä käytössä on useita erilaisia satelliittipaikannusjärjestelmiä, kuten amerikkalainen GPS, venäläinen GLONASS ja vielä kehitteillä olevat eurooppalainen Galileo ja kiinalainen Beidou. Useampien satelliittipaikannusjärjestelmien yhteiskäyttö lisää käytössä olevien satelliittien määrää ja näin ollen myös parantaa satelliittigeometriaa ja GNSS-lukituksen jatkuvuutta. Tämä johtaa paikannuksen tarkkuuden, jatkuvuuden ja luotettavuuden paranemiseen varsinkin hankalissa mittaussympäristöissä, kuten urbaaneissa kanjoneissa. (Li et al. 2015)

Mobiilikartoitusjärjestelmät käyttävät yleensä yhtä tai kahta GNSS-antennia sijainnin määrittämiseen. GNSS-antennit sijoitetaan tyypillisesti ajoneuvon korkeimpaan osaan optimaalisen satelliittinäkyvyyden saavuttamiseksi. Kahden GNSS-vastaanottonimen tapauksessa antennien välistä tunnettua etäisyyttä voidaan käyttää hyväksi ajoneuvon atsimuutin laskemisessa, mikä parantaa paikannusratkaisua. GNSS-antennien välinen etäisyys voidaan määrittää esimerkiksi 5-10 minuutin staattisella GNSS-mittauksella ajoneuvon pysyessä paikallaan. (Puente et al. 2013)

Inertiajärjestelmää voidaan käyttää ajoneuvon sijainnin ja kiertoaseman määrittämiseen alustakoordinaatistossa. Inertiajärjestelmän pääyksikkö, IMU, koostuu kiihtyvyyssantureista ja gyroskoopeista, jotka yhdessä mahdollistavat lineaaristen kiihtyvyyksien ja kulmanopeuksien määrittämisen kolmen ennalta määritetyn alustakoordinaatiston akselin suhteen. (Madeira et al. 2012) INS-havainnot perustuvat lokipaikannukseen, jossa ajoneuvon orientoinnin parametrit lasketaan pelkästään edellisistä havainnoista. Näin ollen INS-havaintojen virheet kasautuvat ajan myötä, minkä takia mobiilikartoitusjärjestelmän toiminta ei voi perustua pelkästään inertiajärjestelmän havaintoihin. (Puente et al. 2013)

GNSS:n avulla saadaan tarkkaa sijaintitietoa, kun satelliittigeometria ja näkyvyys taivaalle ovat hyviä. Huono satelliittigeometria ja näkyvyyttä taivaalle rajoittavat rakennukset, kasvillisuus tai muut esteet voivat kuitenkin aiheuttaa epätarkkuuksia ja katkoksia GNSS-dataan. Inertialaitteisto ei sitä vastoin tarvitse satelliittinäköä havaitessaan muutoksia ajoneuvon sijainnissa ja asennossa, mutta havaintojen tarkkuus heikkenee ajan myötä. Näin ollen GNSS- ja inertialaitteisto täydentävät mainiosti toisiaan: inertiamittaukset auttavat tarkkan sijaintitiedon säilyttämisessä huonossa GNSS-ympäristössä, kun taas GNSS tarjoaa jatkuvasti päivittyvää sijaintitietoa inertialaitteiston tueksi. (Barber et al 2008)

GNSS-, INS- ja DMI-mittausten integrointi toteutetaan yleensä Kalman-suotimen (Kalman 1960) avulla (Barber et al. 2008; Madeira et al. 2012; Puente et al. 2013). Kalman-suodin on pienimmän neliösumman ratkaisu, jossa pyritään löytämään optimaalinen estimaatti ajoneuvon orientoinnille. Se tapahtuu yhdistämällä kaikkien paikannussensorien keräämä, kohinaa ja epätarkkuuksia sisältävä, mittausdata sekä tiedot ajoneuvon dynamiikasta ja mittauslaitteista. (Madeira et al. 2012; Puente et al. 2013) Nämä estimaatit ovat yleensä tarkempia kuin yksittäiset havaintoarvot. (Puente et al. 2013). Kalman-suodin toimii kaksivaiheisesti. Ennustusvaiheessa estimaattia päivitetään ajan myötä aiempien mittaushavaintojen perusteella. Kun jokin paikannussensoreista tekee uuden havainnon, siirrytään päivitysvaiheeseen, jossa uuden havainnon tarjoamaa informaatiota hyödyntämällä määritetään uusi, optimaalinen estimaatti. Tätä uutta estimaattia päivitetään jälleen ajan myötä aiempiin mittaushavaintoihin perustuen, kunnes uusi havainto on saatavilla. (Madeira et al. 2012)

2.2 Kartoitussensorit

Laserkeilain käyttää LiDAR-teknologiaa kerätäkseen tietoa ympäristöstään etäisyys- ja kulmamittauksiin perustuen (Puente 2013). Mobiililaserkeilaus on nopea ja joustava menetelmä mallintaa ympäristöä, lopputuotteenaan kolmiulotteinen pistepilvi. Pistepilven ominaisuudet, kuten pistetiheys, kuvio ja jakauma, riippuvat suuresti laserkeilaimen sijainnista ja kiertotasemasta alustan suhteen, mittaustaajuudesta ja aallonpituudesta. (Kukko et al. 2012)

Kamerajärjestelmä voi koostua yhdestä tai useammasta kamerasta. Mikäli käytetään vain yhtä kameraa, on sen liikuttava, jotta saadaan useita peräkkäisiä kuvauspaikkoja kuvapistepilven luomiseksi valokuvapareista. Johtuen aikaerosta eri kuvauspaikkojen välillä, tämä vaihtoehto soveltuu vain staattisten kohteiden mallintamiseen. (Habib et al. 2014)

Kameran linssijärjestelmän on tarjottava mahdollisuus asettaa aukko ja polttoväli vakioiksi, jotta kameran sisäiset ominaisuudet pysyvät mittaussektion aikana muuttumattomina. (Madeira et al. 2012). Yleensä myös kameran zoom-asetuksen tulisi pysyä muuttumattomana. Perinteisesti kamera fokusoidaan äärettömyyteen fotogrammetrisissa kartoituksissa. On myös tehty tutkimustyötä zoom-riippuvaisesta kalibroinnista (esim. Fraser and Al Ajlouni, 2006), joka mallintaa linssivirheiden variaatiota eri zoom-arvoilla. Tällaisessa tapauksessa zoom-asetuksen ei tarvitse pysyä vakiona kuvienottoprosessin aikana, mutta jokaiselle eri zoom-asetukselle on tehtävä oma kalibrointi. (Fraser and Al Ajlouni, 2006)

Kameratyypin valinnalla on suuri vaikutus kuvien avulla tehtävän 3D-rekonstruoinnin tarkkuuteen. Kartoitetun kohteen sijaintitarkkuuteen vaikuttavat kameran polttoväli, koh-

teen etäisyys, kuvakannan pituus (yhden kameran järjestelmissä vierekkäisten kuvien välinen etäisyys) ja kuvien erotuskyky. (Tao 2000) Pienellä polttovälillä, jota käytetään esimerkiksi kalansilmälinssissä ja panoraamakameroissa, saavutetaan suurempi näkökenttä ja kuvien päällekkäisyys, mikä mahdollistaa kohteen kartoittamisen pienemmällä määrällä kuvia ja luotettavamman kuvien ulkoisten orientointien ratkaisemisen sädekimpputasoituksessa. Pienen polttovälin linssien heikkoutena on suuri GSD eli pikselien geometrinen tarkkuus maastossa. (Strecha et al. 2015) Kohteen etäisyys vaikuttaa optimaalisen polttovälin ja kuvakannan pituuden valintaan, jotta saavutetaan haluttu kuvien peittoisuus. Kuvien erotuskyky puolestaan parantaa kuvahavaintojen pikselitarkkuutta. Erotuskykyä voidaan lisätä esimerkiksi valitsemalla korkearesoluutisempi kamera. (Tao 2000)

Laserkeilaimen ja kameran ominaispiirteet täydentävät hyvin toisiaan. Laserkeilaimet pystyvät keräämään suoraan hyödynnettävää 3D-informaatiota, mutta suhteellisen matalalla resoluutiolla. Kamerate sen sijaan tarjoavat 2D-kuvia korkearesoluutisoin tekstuurein, mutta ilman syvyysinformaatiota. (Cui et al. 2017) Useimmat LiDAR-perusteiset mobiilikartoitusjärjestelmät käyttävätkin kamerajärjestelmän keräämää kuva-aineistoa pistepilven värittämiseen (Puente et al. 2013). Korkealaatuisten mobiilikartoitusjärjestelmien kartoitussensoreina käytetään tyypillisesti useiden laserkeilaimien ja useiden perspektiivikameroiden tai 360° kameroiden yhdistelmää (Angelats & Colomina 2013).

3 Järjestelmäkalibrointi

Alustan mukaan orientoitujen paikannussensorien ja kohdeorientoitujen kartoitussensorien tekemien havaintojen yhteensovittamiseksi vaaditaan joukko kalibrointiprosesseja, joiden kokonaisuutta kutsutaan järjestelmäkalibroinniksi. Järjestelmäkalibrointiin sisältyvät (Madeira et al. 2012; Puente et al. 2013; Tao 2000):

1. Kameroiden kalibroinnit
2. Alustakalibrointi
3. Aikasynkronointi sensorien välillä

Kameran kalibrointi ja kameral ulkoisen orientoinnin selvittäminen kaikilla kuvanottohetkillä ovat välttämättömiä toimenpiteitä kuvista tapahtuvan 3D-rekonstruoinnin kannalta (Puente et al. 2013). Kuvien ulkoisten orientointien selvittämiseksi on ennen mittaussessiota suoritettava alustakalibrointi, jossa selvitetään kameroiden sijainnit ja kiertoasemat toistensa suhteen sekä paikannusjärjestelmän määrittämään alustakoordinaatistoon nähden (Rau et al. 2011). Alustakalibrointi on suoritettava myös mobiilikartoitusjärjestelmän laserkeilaimelle, jotta sen tuottama pistepilviaineisto voidaan siirtää kohdekoordinaatistoon (Glennie 2007). Lisäksi GNSS/INS-havaintojen ja kartoitussensorien keräämän aineiston yhteen liittäminen vaatii tarkan aikasykronoinnin sensorien välillä (Madeira et al. 2012).

3.1 Kameran kalibrointi

Kameran kalibrointi on prosessi, jossa määritetään kameral geometrinen malli kalibrointiparametrien avulla (Luhmann et al. 2014). Yleisimmin käytetyssä Brownin (1971) kameralmallissa kalibrointiparametrit koostuvat sisäisen orientoinnin ja linssivirheiden parametreista. (Luhmann et al. 2016) Perinteisessä testikenttäkalibroinnissa kalibrointiparametrien ratkaiseminen perustuu kontrolli-informaatiota sisältävän testikentän hyödyntämiseen. Tässä kalibrointimenetelmässä testikenttä koostuu selkeästi erottuvista kalibrointikohteista, joiden koordinaatit tai etäisyydet toisiinsa nähden tunnetaan. Kameran kalibrointi tapahtuu sädekimpputasoituksella, jossa kalibrointiparametrien lisäksi ratkaistaan samanaikaisesti testikentästä otettujen kuvien ulkoiset orientoinnit sekä PNS-tasoituksen estimaatit kontrollipisteiden koordinaateille. (Luhmann et al. 2014)

Toinen tekniikka kameral kalibroimiseksi on itsekalibrointi. Siinä kalibrointiparametrit pyritään määrittämään pelkästään kuvien vastinpisteiden perusteella ilman koordinaateiltaan tunnettujen kontrollipisteiden apua. Kalibrointiparametrien ja kuvien ulkoisten orientointien lisäksi myös kuvattavan kohteen kolmiulotteinen rakenne rekonstruoidaan samanaikaisesti sädekimpputasoituksessa. (Luhmann et al. 2014) Menetelmän etuna on sen joustavuus, sillä kuvat sisältävät kaiken tarvittavan informaation kalibrointia varten. Toisaalta estimoitavien parametrien suuresta määrästä johtuen luotettavien tulosten saaminen voi olla hankalaa. (Zhang 2000)

Nykyaikainen lähestymistapa kameral kalibroimiseksi on edellä esiteltyjen kalibrointimenetelmien yhdistelmä, jota kutsutaan itsekalibroituvaaksi sädekimpputasoitukseksi. Se tarkoittaa käytännössä itsekalibrointia, jonka yhteydessä hyödynnetään kontrolli-informaatiota

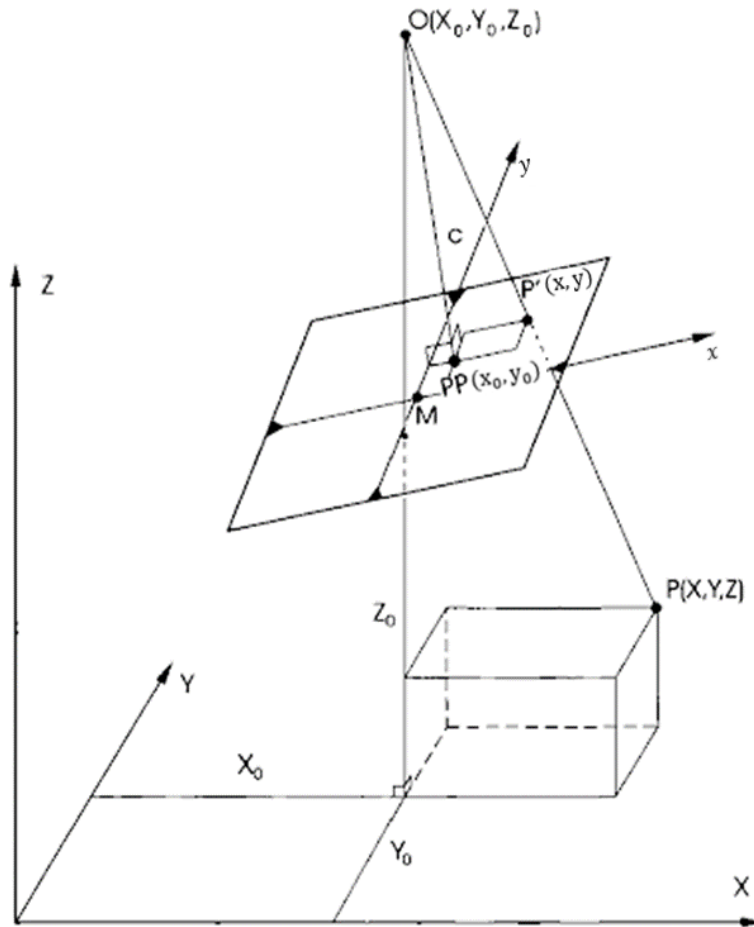
tarjoavaa testikenttää. Itsekalibroituva sädekimpputasoitus on ajan myötä kehittynyt täysin automaattiseksi prosessiksi, jossa vaaditaan vain hyvällä kuvausgeometrialla otetut kuvat, likimääräinen lähtöarvo kameran polttovälille ja kuvilta automaattisesti tunnistettavat signaaloidut tähykset. (Fraser 2013; Remondino & Fraser 2006). Merkittävimpiä edistysaskeleita tällä kehityspolulla ovat tarjonneet Tsai (1987), Heikkilä & Silven (1997) ja Zhang (2000), joiden kehittämiä menetelmiä on hyödynnetty myöhemmissä tutkimuksissa (Remondino & Fraser 2006).

Tsai (1987) kehitti kameran kalibrointiin uuden lähestymistavan, joka mahdollisti kaksiulotteisten kalibroitkohteiden käytön kolmiulotteisten sijaan. Kontrollipisteiden 3D-koordinaatit on tiedettävä tarkasti. Menetelmässä oletetaan, että osalle kalibroitparametreista voidaan antaa lähtöarvot valmistajan ilmoittamista arvoista. Heikkilä & Silven (1997) kehittivät kalibroitimenetelmän, jossa kameraparametrien lähtöarvot approksimoidaan ensin käyttäen lineaarista ratkaisua ja suorittamalla sitten epälineaarinen PNS-tasointu lopullisten kameran sisäisen orientoinnin parametrien ja linssivirheiden korjausparametrien estimoimiseksi. Tätä menetelmää voidaan soveltaa sekä 3D- että 2D-kalibroitkohteille. (Remondino & Fraser 2006) Zhangin (2000) kehittämässä kalibroititekniikassa kaksiulotteinen kalibroitkohde voidaan asettaa kameran näkökenttään sattumanvaraiseen asentoon, mikä helpottaa ja nopeuttaa kalibroitiprosessia huomattavasti. Kalibroitkohteena Zhang (2000) käyttää tasomaista shakkilautakuviota, joka asetetaan kameran eteen erilaisiin asentoihin. Vaihtoehtoisesti kalibroitkohteen sijasta voidaan liikuttaa kameraa. Kalibrointi vaatii onnistuakseen vähintään kaksi kuvaa, joissa kalibroitkohde näkyy erilaisista kuvakulmista. Algoritmi käyttää kontrollipisteinä automaattisesti tunnistettavia shakkiruutujen kulmapisteitä. (Zhang 2000) Kameran kalibroitparametrien määrittäminen tapahtuu samalla tavalla kuin edellä mainitussa Heikkilä & Silvenin (1997) kehittämässä kalibroitimenetelmässä. (Remondino & Fraser 2006)

3.1.1 Perspektiivinen kameramalli

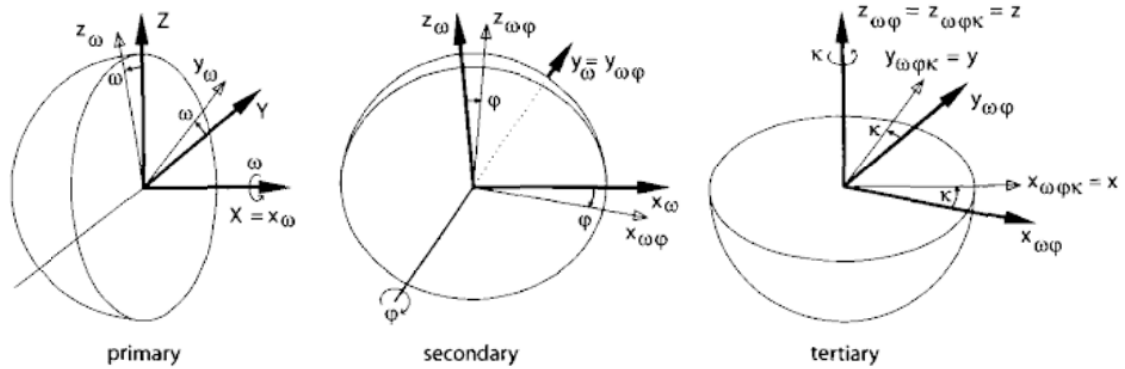
Kameran kalibroinnissa vaaditaan ymmärrystä kameran geometrisista ominaisuuksista. Perinteisesti fotogrammetriassa on käytetty metrisiä perspektiivikameroita. Niissä kuvien katsotaan muodostuvan keskusprojektiokuvauksena, jossa kameran projektiokeskus sijaitsee kameravakion mukaisella etäisyydellä kameran optisen akselin ja kuvatason leikkauskohdasta (kuvan pääpiste). Kameravakiota ja kuvan pääpistettä kutsutaan kameran sisäisen orientoinnin parametreiksi. Ideaalitapauksessa ne määrittävät perspektiivisen kameramallin. (Kraus 2007)

Keskusprojektiokuvaus perustuu kollineaarisuusehtoon, jonka mukaan kohdepiste P , sitä vastaava kuvapiste P' ja projektiokeskus O sijaitsevat samalla suoralla (kuva 1). Kuvakoordinaattien ja kohdekoordinaattien keskinäisen suhteen määrittämisessä on sisäisen orientoinnin parametrien lisäksi tunnettava myös ulkoisen orientoinnin parametrit. Kuvan ulkoisen orientoinnin parametrit koostuvat projektiokeskuksen sijainnista kohdekoordinaatistossa ja kuvan kiertoasemasta kohdekoordinaatistoon nähden. (Kraus 2007)



Kuva 1. Kuvakoordinaattien ja kohdekoordinaattien välinen yhteys ideaalisessa perspektiivikuvassa. Kuvan pääpiste PP ei sijaitse tarkalleen kuvan keskuksessa M. (alkuperäinen kuva: Kraus 2007)

Kiertoasema kohdekoordinaatistossa voidaan ilmaista kiertokulmin ω , φ , κ , joiden määrittäminen tapahtuu hierarkkisessa järjestyksessä (kuva 2). Ensin tehdään kierto ω -akselin suhteen, jonka mukaan kahden muun kiertokulman koordinaattiakselit määritetään. Toisena tehdään kierto φ -akselin suhteen, joka vaikuttaa κ -akseliin, mutta ei enää ω -akseliin. Viimeisenä tehtävällä kierrolla κ -akselin suhteen ei ole vaikutusta muiden akseleiden asentoon. Kaikki kierrot tapahtuvat koordinaattiakselien origoon päin katsottuna vastapäivään. (Kraus 2007)



Kuva 2. Kiertokulmien ω, φ, κ hierarkkinen järjestys koordinaattiakselien suhteen. (Kraus 2007)

Kiertoasema kohdekoordinaatistossa voidaan ilmaista kolmiulotteisella kiertomatriisilla, joka rakentuu seuraavasti (Kraus 2007):

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\kappa & -\cos\varphi\sin\kappa & \sin\varphi \\ \cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\varphi\cos\kappa & \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\varphi\sin\kappa & -\sin\omega\cos\varphi \\ \sin\omega\sin\kappa - \cos\omega\sin\varphi\cos\kappa & \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\varphi\sin\kappa & \cos\omega\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

missä ω on kiertokulma x-akselin suhteen
 φ on kiertokulma y-akselin suhteen
 κ on kiertokulma z-akselin suhteen

Kiertomatriisi voidaan muodostaa myös kiertokulmina yaw/heading (kääntyminen), pitch (nyökkääminen) ja roll (kallistuminen), joita paikannusjärjestelmät tyypillisesti käyttävät alustan kiertoaseman ilmaisuun kohdekoordinaatistossa.

Kuvakoordinaattien ja kohdekoordinaattien keskinäinen suhde perustuu epälineaarisiin kol-linearisuusyhtälöihin (Kraus 2007):

$$\begin{aligned} x &= x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ x &= y_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (2)$$

missä x, y ovat kohdepisteen kuvakoordinaatit
 x_0, y_0 ovat kuvan pääpisteen kuvakoordinaatit
 X, Y, Z ovat kohdepisteen kohdekoordinaatit kohdekoordinaatistossa
 X_0, Y_0, Z_0 ovat kameran projektiokeskuksen kohdekoordinaatit
 c on kameravakio
 r_{ik} ovat kiertomatriisin $R_{\omega\varphi\kappa}$ elementtejä

Todellisuudessa erilaiset linssivirheet johtavat poikkeamiin ideaalisesta keskusprojektiokuvauksesta. Tämän vuoksi perspektiivistä kameramallia on laajennettava linssivirheiden korjausparametreilla. Perspektiivikameroiden kalibroinnissa standardiksi on muodostunut

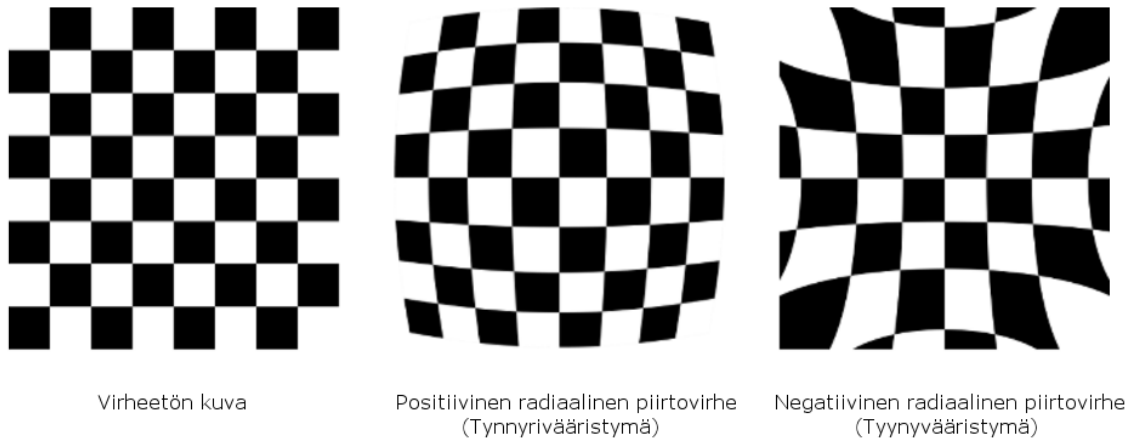
Brownin (1971) määrittelemä kameramalli, joka pitää puoliaan optimaalisimpana määritellynä perspektiiviselle kameramallille. Se koostuu sisäisen orientoinnin parametrien eli kuvan pääpisteen ja kameravakion lisäksi kolmesta radiaalisen piirtovirheen ja kahdesta tangentialisen piirtovirheen kertoimista. Mallia voidaan laajentaa vielä kahdella parametrilla, jotka kuvaavat kuvatason xy -akselien poikkeavuutta. (Luhmann et al. 2016; Remondino & Fraser 2006)

Radiaalinen piirtovirhe johtuu variaatioista valonsäteiden taitumisessa linssijärjestelmässä. (Luhmann et al. 2014) Brownin (1971) mallissa radiaalista piirtovirhettä mallinnetaan kolmannen asteen polynomifunktiolla.

$$\Delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 \quad (3)$$

missä K_1, K_2, K_3 ovat radiaalisen piirtovirheen kertoimia
 $r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$ on radiaalinen etäisyys kuvan pääpisteestä
 $\bar{x} = (x - x_0)$
 $\bar{y} = (y - y_0)$

Yhtälöstä 3 huomataan, että radiaalinen piirtovirhe kasvaa symmetrisesti parametrin r funktiona. Näin ollen radiaalinen piirtovirhe on nolla kuvan pääpisteen kohdalla ja suurenee kuvan reunoja kohti. Radiaalista piirtovirhettä on havainnollistettu kuvassa 3.



Kuva 3. Radiaalisen piirtovirheen vaikutukset kuvaan. (alkuperäinen kuva: OpenCV 2018)

Kuvakoordinaatit x ja y voidaan korjata radiaalisen piirtovirheen osalta seuraavasti (Fraser 2013):

$$\begin{aligned} \Delta x_r &= -\frac{\bar{x}}{c} \Delta c + \bar{x} r^2 K_1 + \bar{x} r^4 K_2 + \bar{x} r^6 K_3 \\ \Delta y_r &= -\frac{\bar{y}}{c} \Delta c + \bar{y} r^2 K_1 + \bar{y} r^4 K_2 + \bar{y} r^6 K_3 \end{aligned} \quad (4)$$

missä Δc on tunnettu poikkeama kameravakiosta c etäisyydellä r .

Tangentiaalinen piirtovirhe (käytetään myös nimitystä epäkeskisyysvirhe) aiheutuu pääosin epäkeskisyudesta ja yksittäisten linssielementtien yhdensuuntaisuusvirheistä linssijärjestelmässä. Sen vaikutus on yleensä huomattavasti radiaalista piirtovirhettä pienempi. (Luhmann et al. 2014)

Tangentiaalisen piirtovirheen vaikutus kuvakoordinaatteihin (Fraser 2013):

$$\begin{aligned}\Delta x_t &= (r^2 + 2\bar{x}^2)P_1 + 2\bar{x}\bar{y}P_2 \\ \Delta y_t &= 2\bar{x}\bar{y}P_1 + (r^2 + 2\bar{y}^2)P_2\end{aligned}\tag{5}$$

missä P_1, P_2 ovat tangentiaalisen piirtovirheen kertoimia

Linssivirheiden korjausparametreissa otetaan usein huomioon myös poikkeamat kuvatason xy-akselien suorakulmaisuudessa. Näiden affiniimuunnoksen parametrien merkitys riippuu käytettävästä kameratyypistä. (Luhmann et al. 2014)

$$\begin{aligned}\Delta x_{aff} &= b_1\bar{x} + b_2\bar{y} \\ \Delta y_{aff} &= 0\end{aligned}\tag{6}$$

Yhtälössä 2 esitettyjä epälineaarisia kollineaarisuusyhtälöitä voidaan nyt laajentaa linssivirheiden korjausparametreilla Δx ja Δy . (Fraser 2013)

$$\begin{aligned}\Delta x &= -\frac{\bar{x}}{c}\Delta c + \bar{x}r^2K_1 + \bar{x}r^4K_2 + \bar{x}r^6K_3 + (r^2 + 2\bar{x}^2)P_1 + 2\bar{x}\bar{y}P_2 + (b_1\bar{x} + b_2\bar{y}) \\ \Delta y &= -\frac{\bar{y}}{c}\Delta c + \bar{y}r^2K_1 + \bar{y}r^4K_2 + \bar{y}r^6K_3 + 2P_1\bar{x}\bar{y} + (r^2 + 2\bar{y}^2)P_2\end{aligned}\tag{7}$$

$$\begin{aligned}x &= x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x \\ y &= y_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y\end{aligned}\tag{8}$$

3.1.2 Itsekalibroituva sädekimpputasoitus

Itsekalibroituvasa sädekimpputasoituksessa kameran kalibrointiparametrit ratkaistaan samalla kertaa kuvien ulkoisten orientointien kanssa PNS-menetelmällä. (Luhmann et al. 2014) PNS-tasointusprosessissa kameran kalibrointiparametrit sekä kuvien projektiokeskusten ja liitospisteiden kuvakoordinaateista muodostuvat sädekimput määritetään siten, että säteet leikkaavat kuvatason niin lähellä liitospisteitä kuin mahdollista ja osuvat mahdollisimman lähelle kontrollipisteitä. (Kraus 2007)

Itsekalibroituvasa sädekimpputasoituksessa korjausten määrittäminen kuvien ulkoisille orientoinneille ja kameran kalibroitiparametreille on tehtävä iteratiivisesti, koska kalibroitiparametrit riippuvat tämänhetkisistä kuvakoordinaattien arvoista. Kuvien tämänhetkiset, korjatut ulkoiset orientoinnit toimivat lähtöarvoina myöhemmin laskettaville kalibroitiparametrien korjauksille. Prosessia jatketaan, kunnes lasketut korjaukset ovat merkityksettömän pieniä. (Luhmann et al. 2014)

Parametrien määrittäminen perustuu yhtälössä 8 esitettyihin linssivirheiden korjausparametreilla laajennettuihin kollineaarisuusyhtälöihin, jotka toimivat sädekimpputasoituksen havaintoyhtälöinä. Yhtälössä 9 havaintoyhtälöitä merkitään funktioilla f_x ja f_y .

$$f_x = x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x \quad (9)$$

$$f_y = y_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y$$

Sädekimpputasoituksen virheyhtälöiden yleinen muoto on

$$v = A\Delta - e \quad (10)$$

missä A on rakennematriisi
 Δ on korjausvektori, joka sisältää korjaukset tuntemattomiin parametreihin
 $e = (l - f^0)$ sisältää kuvahavaintojen residuaalit
 l on mitatut kuvahavainnot x, y
 f^0 on havaintoyhtälön avulla lasketut estimaatit kuvahavainnoille

Itsekalibroituvan sädekimpputasoituksen tapauksessa rakennematriisi A ja korjausvektori Δ jaetaan kuvan ulkoisen orientoinnin, kalibroitiparametrien ja kontrollipisteiden komponentteihin. Virheyhtälöksi tulee:

$$v = \dot{A}\dot{\Delta} + \ddot{A}\ddot{\Delta} + \ddot{\ddot{A}}\ddot{\ddot{\Delta}} - l = v = [\dot{A} \quad \ddot{A} \quad \ddot{\ddot{A}}] \begin{bmatrix} \dot{\Delta} \\ \ddot{\Delta} \\ \ddot{\ddot{\Delta}} \end{bmatrix} - e \quad (11)$$

missä \dot{A} on rakennematriisi ulkoisen orientoinnin parametreille
 \ddot{A} on rakennematriisi kalibroitiparametreille
 $\ddot{\ddot{A}}$ on rakennematriisi kontrollipisteiden kohdekoordinaateille
 $\dot{\Delta}$ on korjausvektori ulkoiselle orientoinnille
 $\ddot{\Delta}$ on korjausvektori kalibroitiparametreille
 $\ddot{\ddot{\Delta}}$ on korjausvektori kontrollipisteiden kohdekoordinaateille

Itsekalibroituvan sädekimpputasoituksen tapauksessa virheyhtälöt kuvalta i mitatulle liitospisteelle j muodostuvat seuraavasti:

$$\begin{bmatrix} v_{x_{ij}} \\ v_{y_{ij}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial f_{x_{ij}}^0 / \partial \omega_i & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \partial g_{y_{ij}}^0 / \partial Z_{0i} & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\omega_i \\ d\phi_i \\ d\kappa_i \\ dX_{0i} \\ dY_{0i} \\ dZ_{0i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \partial f_{x_{ij}}^0 / \partial c & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \partial g_{y_{ij}}^0 / \partial P_2 & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dc \\ dx_0 \\ dy_0 \\ dK_1 \\ dK_2 \\ dK_3 \\ dP_1 \\ dP_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \partial f_{x_{ij}}^0 / \partial X_j & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \partial g_{y_{ij}}^0 / \partial Z_j & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX_j \\ dY_j \\ dZ_j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{ij} - f_{x_{ij}}^0 \\ y_{ij} - f_{y_{ij}}^0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

missä x_{ij}, y_{ij} ovat kuvan i liitospisteen j mitatut kuvakoordinaatit
 $f_{x_{ij}}^0, f_{y_{ij}}^0$ ovat havaintoyhtälöiden $f_{x_{ij}}$ ja $f_{y_{ij}}$ tuottamat estimaatit kuvakoordinaateille x_{ij}, y_{ij}

Tuntemattomat parametrit ratkaistaan normaaliyhtälön avulla, joiden yleinen muoto on

$$A^T P A \Delta = A^T P e \quad (13)$$

missä P on tuntemattomien parametrien painokertoimet sisältävä diagonaalimatriisi

Itsekalibroinnin tapauksessa normaaliyhtälöiksi muodostuu

$$\begin{bmatrix} \dot{A}^T P \dot{A} & \dot{A}^T P \ddot{A} & \dot{A}^T P \ddot{\ddot{A}} \\ \ddot{A}^T P \dot{A} & \ddot{A}^T P \ddot{A} & \ddot{A}^T P \ddot{\ddot{A}} \\ \ddot{\ddot{A}}^T P \dot{A} & \ddot{\ddot{A}}^T P \ddot{A} & \ddot{\ddot{A}}^T P \ddot{\ddot{A}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\Delta} \\ \ddot{\Delta} \\ \ddot{\ddot{\Delta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}^T P e \\ \ddot{A}^T P e \\ \ddot{\ddot{A}}^T P e \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\text{missä } P = \begin{bmatrix} P_\omega & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & P_Z \end{bmatrix}$$

Kun kontrollipisteiden kohdekoordinaatit asetetaan tunnetuiksi, voidaan korjausvektori $\ddot{\Delta}$ sulkea pois yhtälöistä. Silloin ulkoiset orientoinnit ja kalibrointiparametrit ovat ratkaistavissa normaaliyhtälöistä

$$\left(\begin{bmatrix} \dot{A}^T P \dot{A} & \dot{A}^T P \ddot{A} \\ \ddot{A}^T P \dot{A} & \ddot{A}^T P \ddot{A} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{A}^T P \ddot{\ddot{A}} \\ \ddot{\ddot{A}}^T P \ddot{\ddot{A}} \end{bmatrix} (\ddot{\ddot{A}}^T P \ddot{\ddot{A}})^{-1} \begin{bmatrix} \ddot{\ddot{A}}^T P \dot{A} & \ddot{\ddot{A}}^T P \ddot{A} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \dot{\Delta} \\ \ddot{\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}^T P e \\ \ddot{A}^T P e \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{A}^T P \ddot{\ddot{A}} \\ \ddot{\ddot{A}}^T P \ddot{\ddot{A}} \end{bmatrix} (\ddot{\ddot{A}}^T P \ddot{\ddot{A}})^{-1} \ddot{\ddot{A}}^T P e \quad (15)$$

Suuri tuntemattomien parametrien määrä itsekalibroituvasa sädekimpputasoituksessa johtaa herkästi korkeaan korrelaatioon eri parametrien välillä. Kameran sisäisen ja ulkoisen orientoinnin parametrit voivat korreloida voimakkaasti keskenään, mikä on yleinen ongelma etenkin tasomaisia kalibrointikohteita käytettäessä. (Luhmann et al. 2014; Luhmann et al. 2016) Myös tangentiaalisen piirtovirheen parametrit korreloivat voimakkaasti kuvan pääpisteen kanssa (Fraser 2013).

Kalibrointikohteen ja kuvausgeometrian suunnittelu ovat tärkeitä elementtejä itsekalibroituvasa sädekimpputasoituksen onnistumisessa. Kalibrointikohteen tulee olla sellainen, että se tarjoaa kontrolli-informaatiota useista eri kuvauskulmista. Lisäksi kalibrointikohte on kuvausgeometria on valittava siten, että kontrolli-informaatiota on saatavilla kaikissa kamerakoordinaatiston akselien suunnissa. (Luhmann et al. 2016)

Kalibroinnin luotettavuutta voidaan parantaa seuraavin menetelmin:

- Lisäämällä kuvien lukumäärää. Kalibroinnin tarkkuus korreloi kohdepisteen ja kuvien välisten optisten säteiden neliöjuuren kanssa ja näin ollen tarkkuuden kehitys kuvien lukumäärää lisäämällä heikkenee huomattavasti noin kahdeksan säteen per kohdepiste jälkeen (Remondino & Fraserin 2006)
- Suurentamalla kuvien konvergenssikulmia (kohdepisteestä kameran projektiokeskukseen lähtevien optisten säteiden väliset kulmat) voidaan parantaa etenkin kameravakion määrittämisen tarkkuutta (Remondino & Fraser 2006; Luhmann et al. 2014; Luhmann et al. 2016).
- Lisäämällä kontrollipisteiden määrää kuvilla ja hajauttamalla ne tasaisesti ympäri kuva-aluetta reunoja myöten (Luhmann et al. 2016; Remondino & Fraser 2006)
- Kuvien ottaminen eri etäisyyksiltä kalibroitikohteesta (Luhmann et al. 2016; Remondino & Fraser 2006)
- Ottamalla riittävästi kuvia, joissa kameraa on kierretty ortogonaalisesti toistensa suhteen. Tämä vähentää merkittävästi korrelaatiota kuvan pääpisteen ja ulkoisen orientaation parametrien kanssa (Luhmann et al. 2014; Remondino & Fraser 2006)

3.2 Alustakalibrointi

Alustakalibroinnissa kartoitussensoreille voidaan muodostaa kahdenlaisia keskinäisen orientaation ratkaisuja:

- 1) kartoitussensorien keskinäinen orientointi alustan suhteen
- 2) kartoitussensorien keskinäinen orientointi toistensa suhteen

Useamman kartoitussensorin järjestelmässä ainakin yhden kartoitussensorin (referenssisensorin) ja alustan keskinäinen orientointi on ratkaistava. Silloin kartoitussensorien sijainnit ja kiertoasemat alustakoordinaatistossa voidaan määrittää kartoitussensorien keskinäisten orientointien avulla. (Madeira et al. 2012) Referenssikameran osalta alustakalibrointi voidaan toteuttaa joko suoraan alustan suhteen (esim. Jacobsen 2004; Rau et al. 2011) tai sitten kamera-laserkeilain-kalibroinnilla (esim. Zhang & Pless 2004), jossa laserkeilain toimii tyyppillisesti referenssisensorina. Mikäli järjestelmä koostuu sekä kamerajärjestelmästä että laserkeilaimista, ja molemmat sensorityypit kalibroidaan erikseen alustan suhteen, niiden avulla tehtävät kartoitusmittaukset eivät päädy samaan koordinaatistoon. Tällöin kuvat ja laserkeilaimella tuotettu pistepilvi on yhteensovitettava mittausten jälkeen (luku 4). Optimaalisin tapa alustakalibroinnin toteuttamiseksi riippuu kartoitussensorien kokoonpanosta ja ominaisuuksista.

Kameroiden orientointi alustan suhteen voidaan määrittää fotogrammetrisesti testikenttäkalibroinnilla, jossa hyödynnetään koordinaateiltaan tunnettuja kontrollipisteitä ja niistä tehtyjä kuvahavaintoja. Testikenttäkalibrointi voidaan toteuttaa kahdessa osassa (esim. Jacobsen 2004) tai kerrallaan (esim. Rau et al. 2011). Kummassakin tapauksessa kameran sisäisen orientaation parametrit on tunnettava etukäteen. (Rau et al. 2011)

Kaksivaiheisessa menetelmässä referenssikameran orientointi alustaan nähden ratkaistaan vertaamalla referenssikameran ja alustan ulkoisia orientointeja kohdekoordinaatiston suhteen. Referenssikameran ulkoinen orientointi ratkaistaan koordinaateiltaan tunnettujen kontrollipisteiden ja niiden kuvahavaintojen avulla sädekimpputasoituksella. Alustan ulkoinen orientointi määritetään suoraan alustan GNSS/INS-havainnnoista kuvanottohetkellä. (Jacobsen 2004; Rau et al. 2011) Alustakalibrointi muiden kuin referenssikameran suhteen voidaan määrittää ratkaisemalla kameroiden keskinäiset orientoinnit referenssikameran suhteen. Kaksivaiheisen menetelmän etuna on sen yksinkertaisuus: kuvien ulkoisten orientointien parametrit saadaan suoraan sädekimpputasoituksen taitavasta ohjelmistosta. (Rau et al. 2011)

Yksivaiheisessa menetelmässä eli integroidussa sensorien orientoinnissa (ISO) testikenttäkalibrointi toteutetaan kerrallaan GNSS/INS-avusteisella sädekimpputasoituksella, jossa GNSS/INS-havainnot on sulautettu havaintoyhtälöihin. Menetelmän etuna on parempi ulkoisen orientoinnin parametrien estimointi kaksivaiheiseen menetelmään verrattuna ja mahdollisuus suorittaa kalibrintiprosessi kokonaan ilman koordinaateiltaan tunnettuja kontrollipisteitä. Kameroiden keskinäinen orientointi voidaan määrittää samalla tavalla kuin kaksivaiheisessa menetelmässä. Vaihtoehtoisesti kameroiden orientoinnit voidaan laskea suoraan asettamalla kameroille keskinäisen orientoinnin rajoitteita. Tämä mahdollistaa kameroiden keskinäisen orientoinnin ratkaisun myös GNSS/INS-havaintojen puuttuessa. (Rau et al. 2011)

Kameroiden keskinäinen orientointi voidaan ratkaista myös GNSS/INS-havaintojen puuttuessa, jos kameroille asetetaan keskinäisen orientoinnin rajoitteita (ROC). (Rau et al. 2011)

Referenssikameran orientointi alustan suhteen voidaan ratkaista myös kamera-laserkeilainkalibroinnilla. Kamera-laserkeilainkalibroinnissa yksi järjestelmän laserkeilaimista valitaan referenssisensoriksi, jonka suhteen myös referenssikameran orientointi määritetään. Laserkeilain on tyypillisesti kalibroitu ensin valmiiksi, jolloin sen orientointi alustan suhteen tunnetaan.

Laserkeilaimen sijainti ajoneuvokoordinaatistossa voidaan mitata esimerkiksi suoraan geodeettisesti tai Gantry-tyyppisellä koordinaattimittauskoneella (Puente et al. 2013). Laserkeilaimen keskiakselin kiertoaseman määrittämisessä alustaan nähden hyödynnetään päällekkäisiä pistepilviaineistoja, jotka on yleensä mitattu liikkumalla vastakkaisiin suuntiin ja eri etäisyyksiltä kohteesta. Kiertokulmat voidaan selvittää määrittämällä päällekkäisistä pistepilviaineistoista kontrollipisteitä ja käyttämällä PNS-menetelmää optimaalisten kiertokulmien löytämiseksi. Toinen vaihtoehto on säätää kiertokulmia manuaalisesti kokeilemalla, kunnes eri pistepilviaineistoissa näkyvät kohteiden muodot vastaavat visuaalisesti toisiaan. (Glennie 2007)

Laserkeilaimen ja kameran välisiä kalibrintimenetelmiä on aloitettu tutkimaan samoihin aikoihin, kun laserkeilaimia aloitettiin hyödyntämään mobiilikartoitusjärjestelmissä. Zhang & Pless (2004) esittivät menetelmän 2D-laserkeilaimen ja perspektiivikameran keskinäiseen kalibrointiin shakkilautakuvion avulla. Unnikrishnan & Hebert (2005) puolestaan sovelsivat shakkilaudan avulla tehtävää kalibrointia 3D-laserkeilaimelle. Geiger et al. (2012) hyödynsivät kalibroinnissa useampaa shakkilautaa, jotta kamera-laserkeilainkalibrointi voidaan toteuttaa yhdeltä kuvalta. Tutkimuksissa on käytetty useita erilaisia tähysvaihtoehtoja, jotka

ovat havaittavissa sekä laserkeilaimella mitatusta pistepilvestä että kuvilta. Esimerkiksi Osgood & Huang (2013) tutkivat laserkeilain-kamera-kalibrointia laserkeilainaineistolle hyvin soveltuvien pallotähyksten avulla. Park et al. (2014) käyttivät tutkimuksessaan tasomaisia, vinoneliön muotoisia kohteita, joiden kulmat toimivat kohdepisteinä. Tämä tähysvaihtoehto soveltuu hyvin etenkin alhaisen resoluution laserkeilaimille (Park et al. 2014). Scaramuzza et al. (2007) toteuttivat kamera-laserkeilain-kalibroinnin hyödyntämällä luonnollisia kohteita.

3.2.1 Kaksivaiheinen menetelmä

Kuvien ulkoisten orientointien ratkaiseminen sädekimpputasoituksella perustuu yhtälöissä 2-9 johdettuihin havaintoyhtälöihin. Kalibrointiparametrit on tunnettava ennen ulkoisen orientoinnin laskemista. Testikenttäkalibroinnin tapauksessa sädekimpputasoituksen virheyhtälöt muodostetaan yhtälön 10 mukaisella tavalla.

Kuvan i kontrollipisteestä j mitatuille kuvahavainnoille virheyhtälöt ovat muotoa

$$\begin{bmatrix} v_{x_{ij}} \\ v_{y_{ij}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial f_{x_{ij}}^0 / \partial \omega_i & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdots & \partial f_{y_{ij}}^0 / \partial Z_{0i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\omega_i \\ d\varphi_i \\ d\kappa_i \\ dX_{0i} \\ dY_{0i} \\ dZ_{0i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{ij} - f_{x_{ij}}^0 \\ y_{ij} - f_{y_{ij}}^0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Kuvien ulkoisen orientoinnin parametrit voidaan ratkaista yhtälön 13 mukaisista normaaliyhtälöistä.

Kun testikenttäkalibroinnin aikana otettujen kuvien ja alustan ulkoiset orientoinnit kohdekoordinaatiston suhteen tunnetaan ajanhetkellä t , voidaan kuvan ja alustan keskinäinen orientointi ratkaista yhtälöillä (Rau et al. 2011):

$$r_b^k(t) = \left(R_e^b(t) \right)^{-1} (r_e^k(t) - r_e^b(t)) \quad (17)$$

$$R_b^k(t) = \left(R_e^b(t) \right)^{-1} R_e^k(t) \quad (18)$$

missä $r_b^k(t) = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}$ on kameran projektiokeskuksen sijainti IMU:n määrittämän alustakoordinaatiston suhteen ajanhetkellä t
 $R_e^b(t)$ on alustan kiertoasema kohdekoordinaatistossa ajanhetkellä t , määriteltynä kiertokulmin $(\omega_b, \varphi_b, \kappa_b)$
 $r_e^k(t) = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$ on kameran projektiokeskuksen sijainti kohdekoordinaatistossa ajanhetkellä t

$r_e^b(t) = \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix}$ on IMU:n määrittelemän alustakoordinaatiston origon kohde-

koordinaatit ajanhetkellä t

$R_b^k(t)$ on kameran kiertoasema alustan suhteen ajanhetkellä t , määriteltynä kiertokulmin $(\Delta\omega_b^k, \Delta\varphi_b^k, \Delta\kappa_b^k)$

$R_e^b(t)$ on alustan kiertoasema kohdekoordinaatistossa ajanhetkellä t , määriteltynä kiertokulmin $(\omega_b, \varphi_b, \kappa_b)$

$R_e^k(t)$ on kameran kiertoasema kohdekoordinaatistossa ajanhetkellä t , määriteltynä kiertokulmin $(\omega, \varphi, \kappa)$

Jos testikenttäkalibrointi tehdään useammalta kuin yhdeltä kuvalta, kameran ja alustan keskinäiseksi orientointi määritetään laskemalla keskinäisen orientoinnin parametreista keskiarvot. Kiertomatriisit on purettava keskiarvolaskentaa varten kiertokulmiksi $\Delta\omega_b^{ki}, \Delta\varphi_b^{ki}, \Delta\kappa_b^{ki}$.

Muiden kameroiden keskinäiset orientoinnit referenssikameran suhteen lasketaan vertaamalla niiden ulkoisia orientointeja keskenään (Rau et al. 2011):

$$r_{ref}^{ki}(t) = \left(R_e^{ref}(t)\right)^{-1} (r_e^{ki}(t) - r_e^{ref}(t)) \quad (19)$$

$$R_{ref}^{ki}(t) = \left(R_e^{ref}(t)\right)^{-1} R_e^{ki}(t) \quad (20)$$

missä $r_{ref}^{ki}(t) = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}$ on kameran i ja referenssikameran projektiokeskusten välinen paikkavektori ajanhetkellä t

$R_e^{ref}(t)$ on referenssikameran kiertoasema kohdekoordinaatistossa ajanhetkellä t , määriteltynä kiertokulmin $(\omega_{ref}, \varphi_{ref}, \kappa_{ref})$

$r_e^{ki}(t) = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$ on kameran i projektiokeskuksen sijainti kohdekoordinaatistossa ajanhetkellä t

$r_e^{ref}(t) = \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix}$ on referenssikameran projektiokeskuksen sijainti kohdekoordinaatistossa ajanhetkellä t

$R_{ref}^{ki}(t)$ on kameran i kiertoasema referenssikameran suhteen ajanhetkellä t , määriteltynä kiertokulmin $(\Delta\omega_{ref}^{ki}, \Delta\varphi_{ref}^{ki}, \Delta\kappa_{ref}^{ki})$

$R_e^{ref}(t)$ on referenssikameran projektiokeskuksen sijainti kohdekoordinaatistossa ajanhetkellä t , määriteltynä kiertokulmin $(\omega_b, \varphi_b, \kappa_b)$

$R_e^{ki}(t)$ on kameran i kiertoasema kohdekoordinaatistossa ajanhetkellä t , määriteltynä kiertokulmin $(\omega_{ki}, \varphi_{ki}, \kappa_{ki})$

Varsinaisessa mittaussessiossa otettujen kuvien orientoinnit kohdekoordinaatiston suhteen saadaan selville alustakalibroinnissa määritettyjen parametrien avulla. Referenssikameran orientointi kohdekoordinaatistossa ajanhetkellä t voidaan laskea seuraavasti:

$$r_e^{ref}(t) = R_e^b(t) r_b^{ref} + r_e^b(t) \quad (21)$$

$$R_e^{ref}(t) = R_e^b(t) R_b^{ref} \quad (22)$$

missä r_b^{ref} on alustakalibroinnissa määritetty referenssikameran projektiokeskuksen sijainti alustakoordinaatistossa
 R_b^{ref} on alustakalibroinnissa määritetty referenssikameran kiertoasema alustakoordinaatiston suhteen

Vastaavasti kameran i orientointi kohdekoordinaatistossa ajanhetkellä t voidaan laskea käyttämällä alustakalibroinnissa määritettyjä kameran i ja referenssikameran keskinäisen orientoinnin parametreja.

$$r_e^{ki}(t) = R_e^{ref}(t) r_{ref}^{ki} + r_e^{ref}(t) \quad (23)$$

$$R_e^{ki}(t) = R_e^{ref}(t) R_{ref}^{ki} \quad (24)$$

missä r_{ref}^{ki} on alustakalibroinnissa määritetty referenssikameran ja kameran i projektiokeskusten välinen paikkavektori.
 R_{ref}^{ki} on alustakalibroinnissa määritetty kameran i kiertoasema referenssikameran suhteen.

3.2.2 Yksivaiheinen menetelmä

GNSS/INS-avusteisen sädekimpputasoituksen matemaattisena mallina toimii yhtälön 8 mukaiset, linssivirheiden korjausparametreilla laajennetut kollineaarisuusyhtälöt, joihin sisällytetään uusina elementteinä ajoneuvon GNSS/INS-havainnot. Rau et al. (2011) esittävät kollineaarisuusyhtälöt yhtälön 25 muodossa. Yhtälössä 26 kuvakoordinaatit sisältävä vektori on siirretty yhtälön vasemmalle puolelle.

$$r_e^P = r_e^b(t) + R_e^b(t) r_b^k + R_e^b(t) R_b^k m \begin{bmatrix} x - x_0 - \Delta x \\ y - y_0 - \Delta y \\ -c \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} x - x_0 - \Delta x \\ y - y_0 - \Delta y \\ -c \end{bmatrix} = \frac{1}{m} (R_b^k)^{-1} \left((R_e^b(t))^{-1} (r_e^P - r_e^b(t)) - r_b^k \right) \quad (26)$$

missä $r_e^P = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$ ovat kontrollipisteen P kohdekoordinaatit

$r_e^b(t) = \begin{bmatrix} X_b(t) \\ Y_b(t) \\ Z_b(t) \end{bmatrix}$ ovat alustan kohdekoordinaatit ajanhetkellä t

$R_e^b(t)$ on alustan kiertoasema kohdekoordinaatistossa ajanhetkellä t , määritellään kiertokulmina $(\omega_b, \varphi_b, \kappa_b)$

$r_b^k = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}$ kameran projektiokeskuksen sijainti IMU:n määrittämässä alustakoordinaatistossa

R_b^k on kameran kiertoasema alustan suhteen t määriteltynä kiertokulmina $(\Delta\omega_b^k, \Delta\varphi_b^k, \Delta\kappa_b^k)$

$m = \frac{\text{etäisyys kuvatasolla}}{\text{etäisyys kohdekoordinaatistossa}}$ on mittakaavaluku

Yksinkertaistetaan yhtälöitä merkitsemällä

$$f = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = (R_b^k)^{-1} \left((R_e^b(t))^{-1} (r_e^P - r_e^b(t)) - r_b^k \right) \quad (27)$$

Yhtälön 27 avulla yhtälöissä 25-26 johdetut havaintovektorit voidaan ilmoittaa yksinkertaisemmassa muodossa (yhtälö 28). Lopulliset havaintoyhtälöt saadaan jakamalla havaintoyhtälöiden kaksi ylintä yhtälöä alimmalla yhtälöllä, jolloin mittakaavaluku m eliminoiduu (yhtälö 29).

$$\begin{bmatrix} x - x_0 - \Delta x \\ y - y_0 - \Delta y \\ -c \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$x = x_0 - c \frac{f_x}{f_z} + \Delta x \quad (29)$$

$$y = y_0 - c \frac{f_y}{f_z} + \Delta y$$

Merkitään lopullisia havaintoyhtälöitä funktioilla g_x ja g_y .

$$g_x = x_0 - c \frac{f_x}{f_z} + \Delta x \quad (30)$$

$$g_y = y_0 - c \frac{f_y}{f_z} + \Delta y$$

Sädekimpputasoituksen virheyhtälöt liitospisteiden kuvakoordinaateille muodostetaan yhtälön 10 mukaisesti.

Tässä tapauksessa tuntemattomia parametreja ovat $\omega_b, \varphi_b, \kappa_b, \Delta\omega_b^k, \Delta\varphi_b^k, \Delta\kappa_b^k, X_b, Y_b, Z_b, X_0, Y_0, Z_0$. Kuvan i liitospisteen j virheyhtälöiksi saadaan

$$\begin{bmatrix} v_{x_{ij}} \\ v_{y_{ij}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial g_{x_{ij}}^0 / \partial \omega_b & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdots & \partial g_{y_{ij}}^0 / \partial Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\omega_b \\ d\varphi_b \\ d\kappa_b \\ d\Delta\omega_b^k \\ d\Delta\varphi_b^k \\ d\Delta\kappa_b^k \\ dX_b \\ dY_b \\ dZ_b \\ d\Delta X \\ d\Delta Y \\ d\Delta Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{ij} - g_{x_{ij}}^0 \\ y_{ij} - g_{y_{ij}}^0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

missä x_{ij}, y_{ij} ovat kuvan i liitospisteen j mitatut kuvakoordinaatit
 $g_{x_{ij}}^0, g_{y_{ij}}^0$ ovat havaintoyhtälöiden $g_{x_{ij}}$ ja $g_{y_{ij}}$ tuottamat estimaatit
kuvakoordinaateille x_{ij}, y_{ij}

Korjausvektorin Δ parametrit voidaan selvittää yhtälön 13 mukaisella normaaliyhtälöllä. Sädekimpputasoituksen laskentaa jatketaan iteratiivisesti, kunnes korjausvektorin Δ sisältämät tuntemattomien parametrien korjaukset muuttuvat merkityksettömän pieniksi.

Kameroille voidaan asettaa keskinäisen orientoinnin rajoitteita, joiden avulla käänteisen georeferoinnin prosessi voidaan toteuttaa kokonaan ilman GNSS/INS-havaintoja. Yksi kameroista tulee määrittää referenssikameraksi, joka määrittää alustan orientoinnin GNSS/INS-havaintojen sijaan. Sen jälkeen muiden järjestelmän kameroiden keskinäiset orientoinnit lasketaan referenssikameraan nähden. Tällöin yhtälössä 25 esitettyjen havaintoyhtälöiden sisältämät alustan ja kameran keskinäisen orientoinnin parametrit $R_b^k(t)$ ja $r_b^k(t)$ korvataan kameran i ja referenssikameran keskinäisen orientoinnin parametreilla R_{ref}^{ki} ja r_{ref}^{ki} (Rau et al. 2011):

$$r_e^P = r_e^{ref}(t) + R_e^{ref}(t)r_{ref}^{ki} + R_e^{ref}(t)R_{ref}^{ki}m \begin{bmatrix} x - x_0 - \Delta x \\ y - y_0 - \Delta y \\ -c \end{bmatrix} \quad (32)$$

missä $r_e^{ref}(t) = \begin{bmatrix} X_{ref} \\ Y_{ref} \\ Z_{ref} \end{bmatrix}$ ovat referenssikameran projektiokeskuksen kohdekoordinaatit ajanhetkellä t
 $R_e^{ref}(t)$ on referenssikameran kiertoasema kohdekoordinaatistossa ajanhetkellä t , määritellään kiertokulmina $(\omega_{ref}, \varphi_{ref}, \kappa_{ref})$

$$r_{ref}^{ki} = \begin{bmatrix} \Delta X_{ref}^{ki} \\ \Delta Y_{ref}^{ki} \\ \Delta Z_{ref}^{ki} \end{bmatrix}$$
 on referenssikameran ja kameran i projektiokeskusten välinen paikkavektori
 R_{ref}^{ki} on kameran i kiertoasema referenssikameran suhteen, määritellään kiertokulmina $(\Delta\omega_{ref}^{ki}, \Delta\phi_{ref}^{ki}, \Delta\kappa_{ref}^{ki})$

Lopulliset havaintoyhtälöt ja sädekimpputasoituksen ratkaisu kameroiden keskinäiselle orientoinnille johdetaan yhtälöiden 26-31 tapaan. Alustakalibroinnissa määritettyjä parametreja voidaan käyttää varsinaisessa mittaussessiossa otetuille kuville, kun lasketaan referenssikameran tai kameran i orientointi kohdekoordinaatiston suhteen ajanhetkellä t yhtälöiden 21-24 mukaisella tavalla.

3.3 Aikasynkronointi

Useita sensoreita sisältävässä mobiilikartoitusjärjestelmässä synkronointivirheet eri sensoreiden keskuudessa voivat aiheuttaa merkittäviä virheitä, mikäli kartoitussensoreille syötetään ajallisesti väärää informaatiota ajoneuvon sijainnista ja kiertoasemasta. GNSS-vastaanottimet, inertiajärjestelmä, laserkeilaimet ja kamerajärjestelmä toimivat itsenäisesti ja käyttävät aineiston keräämiseen erilaisia taajuuksia. (Rau et al. 2011) Paikannussensorien ja kartoitussensoreiden välisen aikasykronoinnin tarkkuuden merkitys käy ilmi taulukosta 1, jossa esitetään ajoneuvon kulkema matka tyypillisillä nopeuksilla. Alhaisissa 1-2 m/s nopeuksissa aikasykronoinnista johtuvat sijaintivirheet pysyvät pieninä melko suurillakin aikasykronoinnin virheillä. Pienestä nopeudesta huolimatta äkkinäiset muutokset kiertoasemassa voivat vaikuttaa merkittävästi kohteiden kartoituksen tarkkuuteen. Maantienopeuksissa aikasykronoinnilta vaaditaan millisekunnin luokkaa olevaa tarkkuutta, jotta kartoitettujen kohteiden sijaintitarkkuus pysyisi kohtuullisena.

Taulukko 1. Ajoneuvon kulkema matka erilaisilla nopeuksilla.

Aika	1 m/s	2 m/s	40 km/h (11,1 m/s)	60 km/h (16,7 m/s)	80 km/h (22,2 m/s)
100 ms	10,0 cm	20,0 cm	111 cm	167 cm	222 cm
10 ms	1,0 cm	2,0 cm	11,1 cm	16,7 cm	22,2 cm
5 ms	0,5 cm	1,0 cm	5,55 cm	8,34 cm	11,1 cm
2 ms	0,2 cm	0,4 cm	2,22 cm	3,33 cm	4,44 cm
1 ms	0,1 cm	0,2 cm	1,11 cm	1,67 cm	2,22 cm

Tällä hetkellä Navstar GPS -järjestelmä on paras saatavilla oleva aikakehys. Sen tarkkuus on nanosekunnin luokkaa ja sen etuna on yksinkertaisuus ja edullisuus. Lisäksi se on ainoa toteuttamiskelpoinen menetelmä, joka tarjoaa suoran, tarkan ja turvallisen aikasignaalin mobiilikartoitusjärjestelmälle. (Madeira et al. 2012)

Tietokoneen aika voidaan synkronoida GPS-vastaanottimen kanssa kahdella tavalla. Ensimmäinen menetelmä perustuu GPS-vastaanottimen vastaanottamiin NMEA-viesteihin (National Marine Electronics Association), joihin sisältyy GPS-aika. Tällä tavalla tietokoneen ajan tarkkuus korjattuna on 1-10 millisekuntia. Toinen menetelmä hyödyntää GPS-vastaanottimen PPS-signaaleja, joiden avulla päästään erinomaiseen noin 40 nanosekunnin tarkkuuteen. Koska PPS-signaalilta puuttuu informaatio absoluuttisesta ajasta, on sitä käytettävä yhdessä NMEA-viestien kanssa. Kun ohjelmiston kellon ajelehtiminen säännöllisten korjausten välisenä aikana otetaan huomioon, ainoastaan PPS:n ja NMEA-viestien avulla tehty synkronointi säännöllisten, sekunnin välein tapahtuvien korjausten kanssa johtaa luotettavaan millisekunti tason tarkkuuteen tietokoneen ajassa (taulukko 2). (Madeira et al. 2012)

Taulukko 2. Tietokoneen ajan ja GPS-ajan synkronoinnin tarkkuus. (Madeira et al. 2012)

Ajan määrittystapa	Tietokoneen ajan tarkkuus
Itsenäinen tila	2-5 sekuntia per tunti käynnistämisen jälkeen
Säännölliset GPS-korjaukset (1 min) (vain NMEA)	1-10 ms + 20 ms
Säännölliset GPS-korjaukset (1 min) (NMEA + PPS)	10^{-3} ms + 20 ms
Säännölliset GPS-korjaukset (1 s) (vain NMEA)	1-10 ms + 0,3 ms
Säännölliset GPS-korjaukset (1 s) (NMEA + PPS)	10 ms + 0,3 ms

4 Kuvien ja laserkeilausaineiston yhdistäminen

Kuvat ja laserkeilausaineisto on rekisteröitävä samaan koordinaatistoon, jotta laserpisteiden värittäminen kuvapikseleiden väriarvoilla tai laserpisteistä muodostetun 3D-pintamallin teksturoiminen kuva-aineiston avulla olisi mahdollista. 2D-kuvien ja 3D-laserpistepilven yhdistämiseen on kehitetty useita menetelmiä. Suoraviivaisimmissa menetelmissä kamera ja laserkeilain synkronoidaan jo alustakalibroinnin yhteydessä (esim. Zhang & Pless 2004; luku 3.2), jolloin kuvien ja laserkeilausaineiston yhteensovittamisprosessilta vältetään kokonaan. Monissa ratkaisuissa hyödynnetään Structure from Motion -menetelmää (SfM), jonka avulla kuva-aineistosta voidaan rekonstruoida 3D-kuvapistepilvi. Silloin kuvien ja laserkeilausaineiston yhteensovittaminen voidaan toteuttaa 3D-3D-rekisteröinnillä, jossa pistepilvet sovitetaan yhteen 7-parametriseen yhdenmuotoisuusmuunnoksen avulla. Yhteensovitus voidaan tehdä esimerkiksi manuaalisesti määritettävien vastinpisteiden (Pintus et al. 2011) tai lineaaristen vastinpistejoukkojen (Liu et al. 2006) avulla. Molemmissa menetelmissä vain pientä osaa kuvista käytetään vastinpisteiden fotogrammetriseen mittaukseen ja lopulliseen 3D-3D-rekisteröintiin. Loput kuvien ulkoisista orientoinneista perustuvat SfM-prosessiin. Laserkeilausaineiston osalta vastinpisteiden määrittämistä voidaan helpottaa tarkastelemalla laserpisteiden intensiteetti-arvoja (Ikeuchi et al. 2007). Zhao et al. (2005) ratkaisevat 3D-3D-rekisteröinnin automaattisesti ICP-algoritmillä (Besl & McKay 1992) ICP-algoritmin heikkous on sen huono sietokyky kohinapisteitä kohtaan (Ding & Sharma 2017).

4.1 Kuvien yhteensovitus SfM-menetelmällä

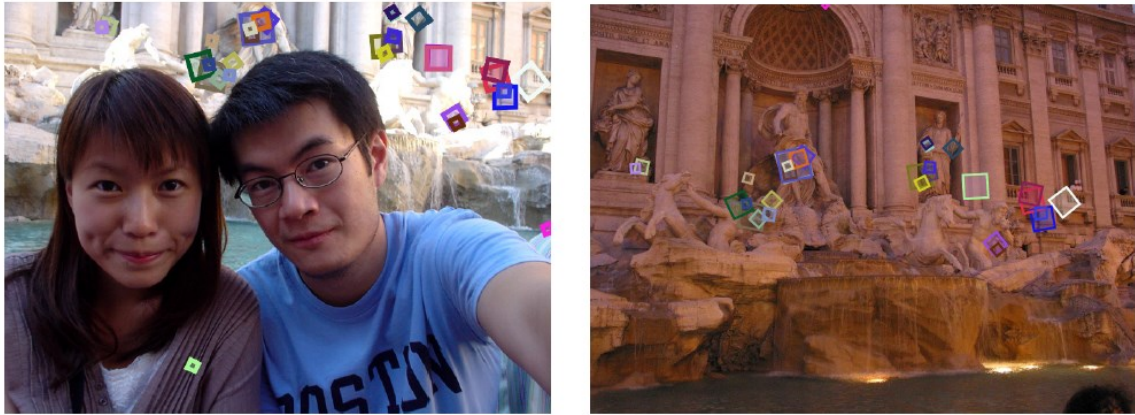
SfM-menetelmän päätehtävä on estimoida mallinnettavan kohteen 3D-rakenne, kuvien ulkoiset orientoinnit ja tarvittaessa myös kameran kalibrointiparametrit. Menetelmä soveltuu parhaiten käytettäväksi kuva-aineistolle, jossa mallinnettava kohde on kuvattuna useasta kuvakulmasta ja kuvien peittoisuus on suuri. (Westoby et al. 2012)

Prosessin ensimmäinen vaihe on tunnistettavien piirteiden eli avainpisteiden etsiminen yksittäisiltä kuvilta. SIFT-algoritmi (Lowe 2004) on yleisimmin käytetty menetelmä avainpisteiden etsimiseen. (Smith et al. 2015) Siinä yksittäisiltä kuvilta pyritään löytämään piirteitä, jotka ovat invariantteja kuvien skaalaukselle ja kierroille ja osittain invariantteja erilaisille valaistusolosuhteille ja kuvauskulmille. (Lowe 2004; Westoby et al. 2012) Avainpisteet voivat olla esimerkiksi kulmapisteitä tai 'klimppejä'. Niille määritetään kuvakoordinaatit ja moniulotteinen deskriptori (esim. 128-ulotteinen SIFT-deskriptori), jonka tehtävänä on kuvata avainpisteen ominaispiirteet (Snavely 2008). Deskriptori lasketaan muuntamalla lokaalit kuvagradientit esitysmuotoon, joka on invariantti valaistusolosuhteiden muutoksille ja erilaisille kuvien orientoinneille (Lowe 2004; Westoby et al. 2012). Avainpisteet tunnistetaan automaattisesti koko kuvan alueelta ja kaikilta mittakaavoilta. Niiden lukumäärä yksittäisellä kuvalla riippuu pääosin kuvan tekstuurista ja resoluutiosta. Kuvilta, joilla on monimuotoinen tekstuuri ja korkea resoluutio, on tunnistettavissa eniten avainpisteitä. (Westoby et al. 2012) Tyypillisesti yksittäiseltä kuvalta on löydettävissä tuhansia avainpisteitä (Snavely 2008).



Kuva 4. Esimerkki yhdeltä kuvalta löydetystä SIFT-avainpisteistä. (Snavely 2008)

Avainpisteiden etsimisen jälkeen on vuorossa toisiaan vastaavien avainpisteiden, eli liitospisteiden, tunnistaminen useilta kuiltta. Liitospisteiden määrittäminen kahdelta kuvalta tapahtuu etsimällä jokaiselle yhdeltä kuvalta löytyneelle avainpisteelle lähin vastaavuus toisen kuvan avainpisteistä deskriptorin kuvaaman moniulotteisen ominaisvektorin perusteella. Kaikki avainpisteet eivät välttämättä ole tunnistettavissa jokaiselta kuvalta, joten tunnistettujen liitospisteiden hyväksymisen perusteeksi luodaan kynnsarvo. Kynnsarvon määrittämisessä voidaan hyödyntää esimerkiksi ANN-algoritmia (Approximate Nearest Neighbour; Arya et al. 1998) ja RANSAC-algoritmia (Random Sample Consensus; Fischler and Bolles 1981). (Smith et al. 2015; Snavely 2008; Westoby et al. 2012) Lisäksi liitospisteiden luotettavuutta voidaan parantaa käyttämällä yksittäisten avainpisteiden sijasta avainpisteiden osajoukkoja, jotka ovat tunnistettavissa vähintään kolmelta kuvalta ja joiden kohde ja sen sijainti, mittakaava ja orientointi täsmäävät kuvien kesken. (Lowe 2004; Westoby et al. 2012) Nämä ristiriidattomat avainpisteiden klusterit voidaan muodostaa Houghin muunnoksella (Ballard & Brown 1982; Lowe 2004). Avainpisteklusterien käyttämisestä yksittäisten avainpisteiden sijaan on hyötyä myös liikkuvista kohteista muodostettujen avainpisteiden suodattamisessa. (Westoby et al. 2012)



Kuva 5. Kahden kuvan väliltä löydetyt SIFT-liitospisteet. (Snavely 2008)

Avainpisteiden tunnistamisen ja liitospisteiden määrittämisen jälkeen suoritetaan sädekimpputasoitus, jossa ratkaistaan samalla kertaa liitospisteiden 3D-kohdekoordinaatit ja kuvien ulkoiset orientoinnit. Sädekimpputasoituksessa voidaan määrittää myös kameran kalibrointiparametrit liitospisteiden avulla, ellei niiden arvoja ole määritetty jo aiemmin. (Smith et al. 2015; Westoby et al. 2012) Sädekimpputasoituksen lopputuotteena saadaan harva, mittakaavaton ja georeferoimaton 3D-kuvapistepilvi (Smith et al. 2015).

Harvan kuvapistepilven asettaminen oikeaan mittakaavaan ja georeferointi tunnettuun koordinaattijärjestelmään onnistuu joko käyttämällä koordinaateiltaan tunnettuja kontrollipisteitä (vähintään kolme kontrollipistettä) tai hyödyntämällä GNSS/INS-havaintoja. Yleinen hybridimenetelmä on asettaa kuvien ulkoisten orientointien lähtöarvot GNSS/INS-havaintojen perusteella ja parantaa harvan kuvapistepilven 3D-kohdekoordinaattien tarkkuutta hyödyntämällä sädekimpputasoituksessa kontrollipisteiden tunnettuja kohdekoordinaatteja (esim. Rippin et al. 2015; Ryan et al. 2015) Kontrollipisteiden tai GNSS/INS-havaintojen tarjoama lisäinformaatio voidaan liittää osaksi sädekimpputasoitusta, joka voidaan ratkaista uudelleen kuvien yhteensovittamisen optimoimiseksi. (Smith et al. 2015)

4.2 3D-3D-rekisteröinti vastinpisteiden avulla

Kuvapistepilven ja laserpistepilven välinen yhteensovitus (3D-3D-rekisteröinti) voidaan toteuttaa 7-parametrin kolmiulotteisella yhdenmuotoisuusmuunnoksella, joka on muotoa (Kraus 2007)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + mR \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (33)$$

missä a_x, a_y, a_z ovat siirtoparametreja

m on koordinaattijärjestelmien välinen mittakaavakerroin

$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$ on yhtälössä 2 esitetty 3D-kiertomatriisi

x, y, z ovat muunnettavan pisteen xyz-koordinaatit

X, Y, Z ovat muunnettavalle pisteelle määritetyt XYZ-koordinaatit

3D-3D-rekisteröinti voidaan ratkaista, kun tiedetään kolmen vastinpisteen koordinaatit kahdessa koordinaattijärjestelmissä. Yhtälössä 33 esitetyn muunnoksen tuntemattomat parametrit ratkaistaan PNS-tasoituksella, jossa minimoidaan referenssipisteiden ja niiden vastinpisteiden välinen etäisyys XYZ-koordinaatistossa. (Horn 1987)

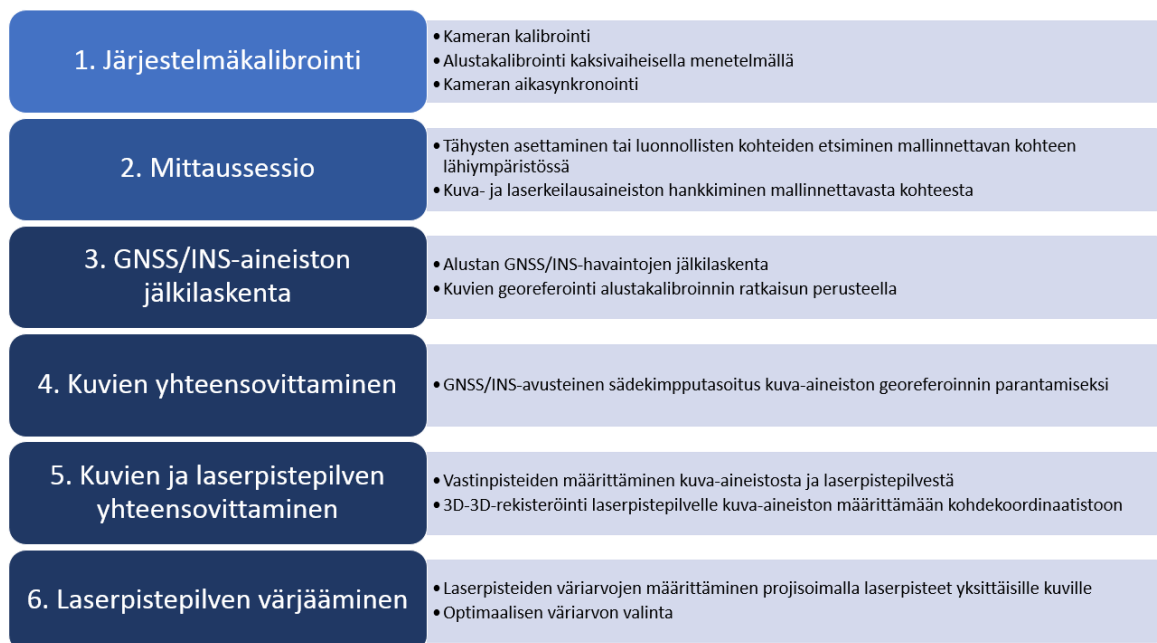
Jos kuvapistepilven ja laserpistepilven mittakaavat oletetaan samoiksi, voidaan mittakaavaluvuksi määrittää $m = 1$. Silloin yhtälö 33 voidaan esittää yksinkertaisemmassa muodossa

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & a_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & a_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & a_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

Kuvien ja laserkeilausaineiston yhteensovituksen jälkeen laserpisteet voidaan projisoida kuvatasolle yhtälössä 8 esitettyjen linssivirheiden korjausparametreilla laajennettujen kollineaarisuusyhtälöiden avulla. Näin ollen laserpisteiden väriarvot voidaan määrittää yksittäisiltä kuvilta niiden kuvakoordinaatteja vastaavien RGB-arvojen perusteella.

5 Kameran liittäminen mobiilikartoitusjärjestelmään

Tutkimuksen tavoitteena oli liittää kamera veneeseen kiinnitettyyn mobiilikartoitusjärjestelmään ja hyödyntää hankittua kuva-aineistoa laserkeilaimella tuotetun pistepilviaineiston parempaan visualisointiin. Laserpistepilven värityksen mahdollistamiseksi suoritettiin kuvan 6 mukaiset toimenpiteet järjestelmäkalibroinnille sekä kuva- ja laserkeilausaineistojen yhteensovittamiselle.



Kuva 6. Tutkimuksessa käytetty prosessi laserpistepilven värjäämiseksi.

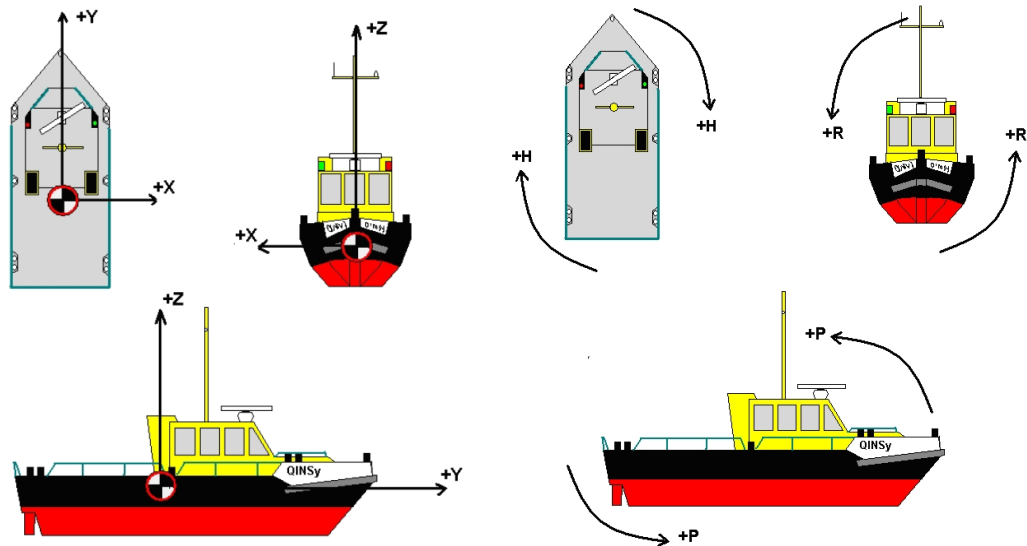
5.1 Käytetty laitteisto

Työn kokeellisessa osuudessa mobiilikartoitusjärjestelmänä käytettiin mittausvenettä, jonka sensoreina toimivat integroitu GNSS/INS-laitteisto, monikeilainkaikuluotain (ei käytössä tässä työssä), laserkeilain ja uutena komponenttina kamera. Järjestelmän sensorien sijainnit näkyvät kuvassa 7. Sensoreiden hallinta mittaussession aikana tapahtuu tietokoneelle asennetun QINSy-ohjelmiston kautta.



Kuva 7. Mittausvene ja sensorien asettelu. IMU-yksikkö on sijoitettu lähelle veneen massakeskipistettä. Laserkeilain (oikealla alhaalla) asetetaan kameran oikealla puolella olevaan alustaan ennen mittaussessiota. GNSS-antennien välinen peruslinja on noin 3 metriä.

Paikannusjärjestelmänä toimii APPLANIX POS MV Wavemaster II -järjestelmä, joka koostuu kahdesta GNSS-vastaanottimesta, IMU-yksiköstä ja PCS-järjestelmästä. PCS hallinnoi GNSS-vastaanottimia ja IMU-yksikköä ja muuntaa niiden tekemät havainnot oikeaan formaattiin muissa järjestelmissä tapahtuvaa jatkokäsittelyä varten. PCS:n ohjelmiston toimintoihin kuuluu roll-, pitch- ja heading-arvojen laskeminen kiihtyvyyssantureiden ja gyroskoopien antamista tiedoista, Kalman-suodin, joka korjaa inertiajärjestelmän ratkaisuja GNSS-havaintojen perusteella, ja GPS Azimuth Measurement Subsystem (GAMS), joka laskee todellisen heading-arvon hyödyntäen duaali-GNSS-vastaanottimien tekemiä havaintoja. (Applanix2017) Paikannusjärjestelmä määrittää alustakoordinaatiston, jota havainnollistetaan kuvassa 8.



Kuva 8. Alustakoordinaatiston koordinaattiakselien sekä roll (R)-, pitch (P)- ja heading (H)-arvojen määrittäminen. (QINSy 2018)



Kuva 9. APPLANIX POS MV Wavemaster II -järjestelmän komponentit: IMU, PCS ja kaksi GNSS-vastaanotinta.

Taulukko 3. Applanix POS MV Wavemaster II -järjestelmän tarkkuudet (σ -arvot) 3 m peruslinjalla. (Applanix 2017)

	DGPS	RTK	PPK	GNSS-katkoksen aikana
Sijainti	0,5 – 2 m	Vaaka: 8 mm Pysty: 15 mm	Vaaka: 8 mm Pysty: 15 mm	n. 9 m/min (RTK) n. 2 m/min (PPK)
Roll & Pitch	0,03°	0,02°	0,015°	0,04°
Heading	0,023°	-	-	< 2°/tunti (merkityksettömiä < 1 min katkoille)

QINSy-ohjelmisto ilmoittaa alustan kiertoaseman roll-, pitch- ja heading-kiertokulmina käyttäen seuraavanlaista kiertomatriisia:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta + \sin\psi\sin\phi\sin\theta & \sin\psi\cos\phi & \cos\psi\sin\theta - \sin\psi\sin\phi\cos\theta \\ -\sin\psi\cos\theta + \cos\psi\sin\phi\sin\theta & \cos\psi\cos\phi & -\sin\psi\sin\theta - \cos\psi\sin\phi\cos\theta \\ -\cos\phi\sin\theta & \sin\phi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (35)$$

missä ψ on heading-kulma
 ϕ on pitch-kulma
 θ on roll-kulma

Kartoitussensoreina käytettiin valmiiksi kalibroituja Leica ScanStation P40 -laserkeilainta ja Aalto-yliopistolta lainassa ollutta Nikon D7100 24 megapikselin järjestelmäkameraa. Kameraan asennettiin Samyangin 16mm kiinteän polttovälin objektiivi, joka fokuoitiin ääretömyyteen. Kameran aukon arvoksi asetettiin f/13, mikä mahdollistaa syväterävien kuvien ottamisen. ISO-arvo ja suljinnopeus asetettiin eri kalibroitumisprosesseissa ja mittaussessioissa eri tavoin kuvaolosuhteiden mukaisesti. Kuvienottoväliksi asetettiin 2,5 sekuntia.

Kamera ja laserkeilain asetettiin vierekkäin likimääräisesti samalle korkeudelle, jotta molempien sensoreiden keräämät aineistot osuisivat mahdollisimman hyvin päällekkäin. Molemmat kartoitussensorit suunnattiin veneen kulkusuuntaan nähden oikealle, kutakuinkin alustakoordinaatiston X-akselin suuntaisesti.

Taulukko 4. Leica Scanstation P40 -laserkeilaimen tarkkuudet (σ -arvot). (Leica 2015)

Leica ScanStation P40 -laserkeilaimen ominaisuudet	
3D-sijaintitarkkuus	3 mm (50 m); 6 mm (100 m)
Etäisyysmittauksen tarkkuus	1,2 mm + 10 ppm
Kulmamittauksen tarkkuus (vaaka / pysty)	0,0023° / 0,0023°
Skannausnopeus	500 000 pistettä / s

Taulukko 5. Nikon D7100 järjestelmäkameran ominaisuudet. (Nikon 2013)

Nikon D7100 järjestelmäkameran ominaisuudet	
Teholliset kuvapistteet	24,1 miljoonaa
Kuvakenno	23,5 x 15,6 mm CMOS-kenno
Kuvan resoluutio	6000 x 4000 pikseliä

5.2 Järjestelmäkalibroinnin toteutus

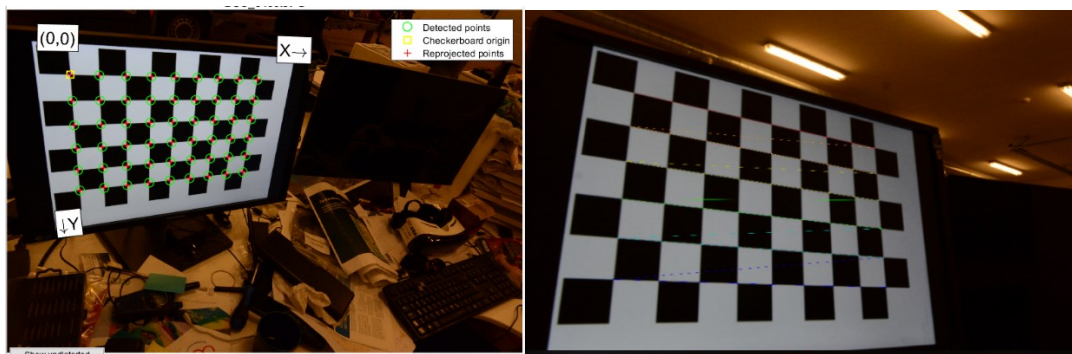
Tässä luvussa esitetään järjestelmäkalibroinnissa käytetyt kalibroitikohteet ja kalibrointimenetelmät kameran liittämiseksi mobiilikartoitusjärjestelmänä toimineeseen mittaveneeseen.

5.2.1 Kameran kalibrointi

Mobiilikartoitusjärjestelmään liitettävän Nikon D7100 järjestelmäkameran kalibroinnissa vertailtiin neljää eri kalibrointimenetelmää:

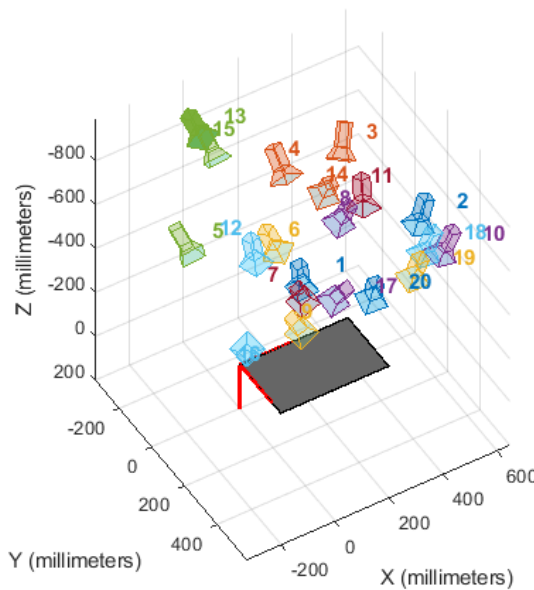
- 1) Shakkilautakalibrointi Matlab-ohjelmiston Camera Calibrator -työkalulla ("Matlab")
- 2) Shakkilautakalibrointi OpenCV:n konenäkökirjastoon perustuvalla skriptillä ("OpenCV")
- 3) Itsekalibrointi Agisoft Photoscan -ohjelmistolla ilman koordinaateiltaan tunnettuja kalibrointikohteita ("Agisoft PS")
- 4) Itsekalibroituva sädekimpputasoitus iWitness-ohjelmistolla käyttäen apuna kontrolli-informaatiota tarjoavia tähyksiä ("iWitness")

Shakkilautakalibroinnit "Matlab" ja "OpenCV" perustuvat molemmat Zhangin (2000) tutkimuksessa esitettyyn menetelmään, jossa kalibrointiparametrit selvitetään tekemällä itsekalibroituva sädekimpputasoitus kahdelle tai useammalle tasomaisesta shakkilautakuviosta otetulle kuvalle. Shakkiruutujen kulmakohtien yhtymäkohdat määritetään kalibroinnin kontrollipisteiksi ja niiden 2D-koordinaatit lasketaan shakkiruutujen leveyden perusteella. Shakkilautakuvion on oltava asymmetrinen, jotta kontrollipisteiden automaattinen tunnistus ja orientointi onnistuvat ongelmitta. Tässä työssä "Matlab"- ja "OpenCV"-kalibrointimenetelmissä käytettiin 10x7-kokoista shakkilautaruudukkoa, jonka vasemman puoleisimmat ylä- ja alaruudut ovat mustia ja oikean puoleisimmat valkoisia. Vasemmassa yläkulmassa oleva musta ruutu on 9x6-kontrollipisteistön origo ja xy-akselien suunnat voidaan määrittää shakkilautakuvion kulmissa sijaitsevien ruutujen värien perusteella (kuva ?).



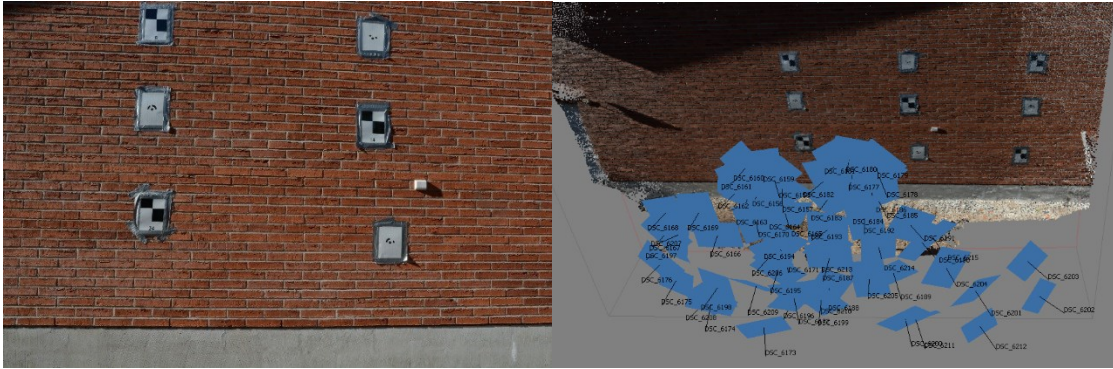
Kuva 10. Shakkiruutujen nurkkien yhtymäkohtien tunnistus Matlab-ohjelmiston Camera Calibrator -työkalulla (vasen) ja OpenCV:n konenäkökirjastoon perustuvalla skriptillä (oikea).

Yksittäisten shakkiruutujen leveydet tietokoneen Led-näytöllä olivat noin 42 mm. Kameran suljinnopeudeksi asetettiin 1/50 sekuntia ja ISO-arvoksi 1800. Shakkilautakalibroinnit suoritettiin hieman hämärässä sisätilassa, minkä vuoksi ISO-arvo jouduttiin asettamaan korkeaksi riittävän kontrastin takaamiseksi kontrollipisteiden automaattista tunnistamista varten. Kuvat pyrittiin ottamaan mahdollisimman vakaalla käsiotteella. Shakkilautakalibrointien kuva-aineistona käytettiin noin 20 kuvan sarjoja, joissa shakkilautakuviota on kuvattu useista eri kuvakulmista (kuva 11). Todellisuudessa kuvia jouduttiin ottamaan enemmän, koska Matlabin Camera Calibrator -työkalu ja OpenCV:n konenäkökirjastoon perustuva skripti epäonnistuivat kontrollipisteistön tunnistamisessa joiltakin kuvilta. Lopulliseen kuva-aineistoon valittiin vain sellaiset kuvat, jotka hyväksyttiin kummassakin menetelmässä. Yhteensä noin neljännes kuvista jouduttiin hylkäämään.



Kuva 11. Esimerkki shakkilautakalibrointien kuvausgeometriasta. Kamera-asemien ulkoiset orientoinnit on visualisoitu MATLAB Camera Calibrator -työkalun avulla.

Tiiliseinä tarjoaa hyvän tekstuurin avainpisteiden etsimiseen itsekalibroinnissa. Kalibrointi suoritettiin hyvissä kuvausolosuhteissa aurinkoisessa säässä. Kameran suljinnopeudeksi asetettiin 1/320 sekuntia ja ISO-arvoksi 200. Suljinnopeus asetettiin varmuuden vuoksi pieneksi, koska osa kuvista otettiin hankalista asennoista. Itsekalibrointia varten tiiliseinästä otettiin 60 kuvan sarjoja monipuolisella kuvausgeometrialla (kuva 12). Tiiliseinällä olevien tähyksien geodeettisesti mitattuja 3D-koordinaatteja ei hyödynnetty itsekalibroinnin yhteydessä, joten kalibrointi perustuu ainoastaan itsekalibroinnissa määritettyihin kuvien välisiin liitospisteisiin.

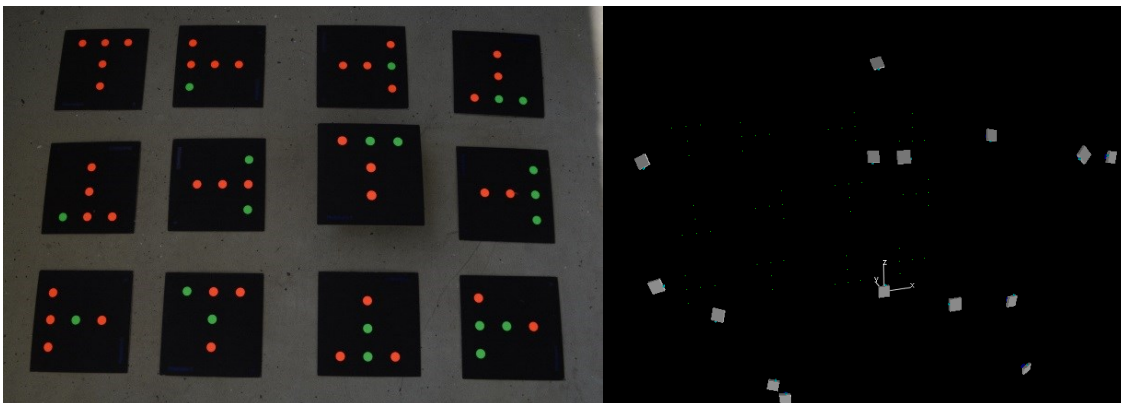


Kuva 12. Esimerkkikuvat kalibroitinkohteesta ja kuvausgeometriasta Agisoft Photoscan -ohjelmistolla toteutetusta itsekalibroinnista.

Agisoft Photoscan -ohjelmistolla suoritettu kuvien yhteensovitus toteutettiin seuraavilla asetuksilla:

- Kuvien yhteensovituksen tarkkuus: ”Highest”
 - Kuvien koot määritetään kaksinkertaiseksi alkuperäisiin verrattuna
- Kuvaparien esivalinta: ”Generic preselection”
 - Kuvaparien esivalinta toteutetaan kuvien avainpisteiden perusteella neljäsosan kokoisilta kuvilta
- Avainpisteiden maksimimäärä: 120 000
- Liitospisteiden maksimimäärä: 12 000

iWitness-kalibroinnin testikenttään sisältyi 12 T-muotoista tähyistä, joista yksi asetettiin muita tähyksiä korkeammalle. Yksittäiset tähykset koostuvat viidestä ympyrästä, jotka ovat väriltään punaisia tai vihreitä. Yksittäisten tähysten ympyröiden väliset etäisyydet ovat vakioita. Eri väriyhdistelmien avulla tähykset ovat automaattisesti tunnistettavissa. Kalibrointi tapahtui ulko-olosuhteissa aurinkoisella säällä, mutta tähykset sijaitsivat varjossa tasaisella betonilattialla. Suljinnopeus asetettiin 1/250 sekuntiin ja ISO-arvo lukemaan 400.



Kuva 13. iWitness-tähyksistä muodostettu testikenttä ja esimerkkikuva kuvausgeometriasta.

5.2.2 Alustakalibrointi

Työssä toteutettiin alustakalibrointi kiinteälle alustalle kiinnitetyn kamerasijainnin ja kiertotasen määrittämiseksi alustakoordinaatistoon nähden. Käytetty kalibrointimenetelmä

perustuu luvussa 3.2.1 esitettyyn kaksivaiheiseen menetelmään, jossa kameran ulkoinen orientointi kohdekoordinaatistossa ratkaistaan fotogrammetrisesti testikenttäkalibroinnilla ja tätä ratkaisua verrataan suoraan alustan jälkilaskettuihin GNSS/INS-havaintoihin kuvanottohetkeltä. Alustakalibrointia varten rakennettiin testikenttä, johon sisältyi 18 seinälle kiinnitettyä tähystä ja 6 väliaikaista lisätäystä. Lisätäysten avulla kameran ja kontrollipisteiden etäisyyksiin saatiin variaatiota. Alustakalibrointi suoritettiin vain yhdeltä kuvalta, joka otettiin mittausveneeseen pysyessä paikallaan. Kamera-aseman ja lisätäysten sijainnit valittiin sillä tavalla, että kaikki tähykset olivat havaittavissa kuvalta ja ne hajaantuivat tasaisesti ympäri kuva-aluetta. Tähysten sijoittamista kuva-alueen reunoille vältettiin linssivirheiden vaikutuksen minimoimiseksi. Tähysten 3D-koordinaatit mitattiin geodeettisesti GNSS- ja takymetrimittauksin. Kameran asetuksina käytettiin 1/640 sekunnin suljinnopeutta ja ISO-arvoa 200.

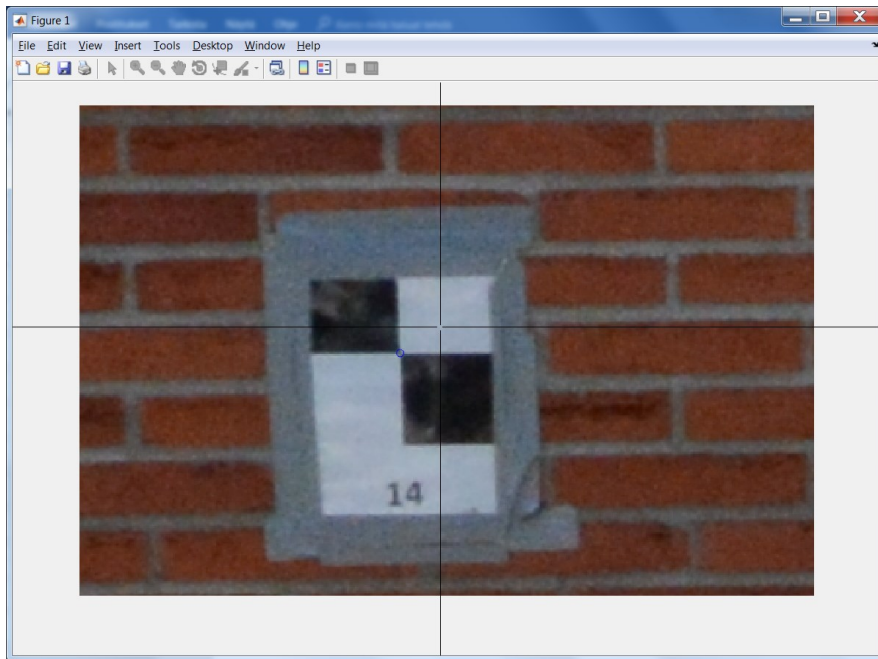


Kuva 14. Alustakalibrointia varten otettu kalibrointikuva, jonka avulla ratkaistiin kameran ulkoinen orientointi.

Kameran ulkoisen orientoinnin ratkaisemista varten rakennettiin Matlab-funktio, joka perustuu koordinaateiltaan tunnettujen tähysten ja niiden kuvahavaintojen avulla tehtävään PNS-tasoitukseen (perustuu yhtälössä 8 esitettyihin havaintoyhtälöihin). Kameran kalibrointiparametrit ratkaistiin ennen alustakalibrointia Agisoft Photoscan -ohjelmistolla toteutetulla itsekalibroinnilla. Kehitetty funktio tarvitsee kalibrointiparametrien lisäksi likimääräiset lähtöarvot kameran projektiokeskuksen sijainnille ja kiertoasemalle kohdekoordinaatistossa. Lähtöarvo projektiokeskuksen sijainnille määritettiin mittaamalla takymetrillä kameran objektiivin kylkeen, jolloin lähtöarvon tarkkuus oli noin 10 cm luokkaa. Kameran oletettiin olevan asennettu hieman alaviistoon ilman kallistusta, joten pitch- ja roll-kiertokulmien lähtöarvoiksi asetettiin 85° ja 0° ja lähtökohtainen heading-arvo määritettiin suuripiirteisellä kompassisuunnalla arvoon 315° .

Kameran ulkoisen orientoinnin laskemiseen käytettävän Matlab-funktion yhteyteen luotiin graafinen työkalu kuvahavaintojen kuvakoordinaattien poimimista varten. Työkalun toimintoja ovat kuvan lähentäminen ja loitonnus sekä kuvahavaintojen tallennus erilliseen *.csv-

tiedostoon. Kuvahavaintojen tekeminen tapahtui kokonaan manuaalisesti, eikä työkalu hyödyntänyt minkäänlaisia automaattisia tunnistusmenetelmiä.

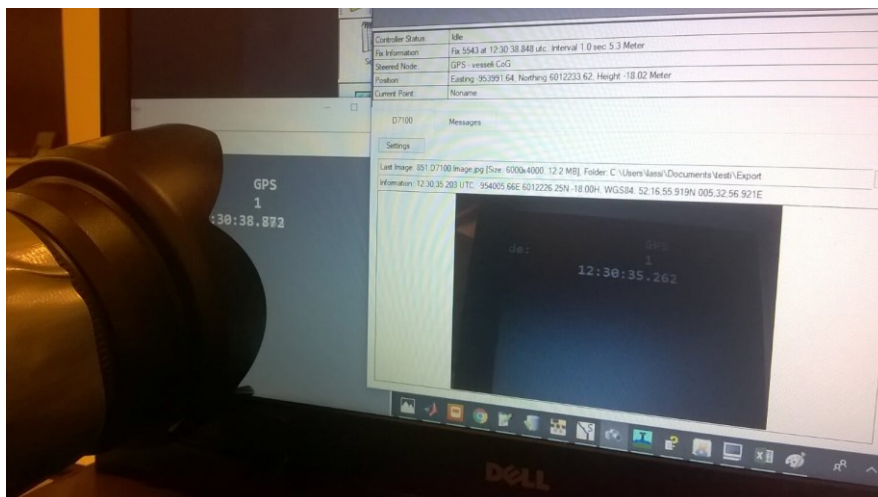


Kuva 15. Kuvahavaintojen tekeminen Matlab-pohjaisella graafisella työkalulla. Kuvassa näkyvä ristitähhtiin siirretään yksitellen jokaisen tähyksen keskikohtaan, jonka jälkeen tähyksistä tehtyjen kuvahavaintojen kuvakoordinaatit tallentuvat erilliseen tiedostoon.

Alustan orientointi määritettiin suoraan POSPac-ohjelmistolla jälkilasketuista GNSS/INS-havainnoista kuvanottohetkellä. Kameran ja alustakoordinaatiston välisten paikkavektorin ja kiertokulmien laskenta on esitetty yhtälöissä 17-18.

5.2.3 Karkea aikasykronointi

Kuvien ja alustan GNSS/INS-havaintojen välistä aikasykronointia varten on selvítettävä kameran laukausignaalin ja todellisen kuvanottohetken välinen aikaero eli latenssi. Kameran latenssin selvittämiseksi yritettiin QINSy-ohjelmiston manuaalisesti esitettyä menetelmää, jossa kameralla otetaan kuvia 10 Hz taajuudella päivittyvästä GPS-ajasta tietokoneen näytöllä. Kamera liitetään USB-johdolla tietokoneeseen ja kuvien ottaminen tapahtuu QINSy-ohjelmiston kameranhallintaikkunan välityksellä. Kuvanoton jälkeen kameran laukausignaalin aikaa verrataan kuvalla näkyvään aikaan. Tämän aikaeron pitäisi kertoa arvo kameran latenssille. Ongelmia tuottaa kuitenkin näytöllä näkyvän juoksevan kellonajan hidas päivitysnopeus: 10 Hz taajuudella kellonaika päivittyy noin 100ms välein. Tästä syystä kameran latenssin selvittämiseksi tällä menetelmällä päädyttiin ottamaan 1000 kuvan suuri otos ja kameran latenssiksi määritettiin aikaeron maksimiarvo.



Kuva 16. Kameran latenssin selvittäminen QINSy-ohjelmiston ohjeistuksen mukaisesti. Vasemmassa ikkunassa näkyy juokseva GPS-kellonaika, joka päivittyy 10 Hz taajuudella. Oikeassa ikkunassa näkyy kameranhallinnikkuna, joka näyttää viimeiseksi otetun kuvan sekä laukaususignaalin kellonajan.

Tämän aikasynkronointimenetelmän karkeudesta johtuen kameran latenssin määrittystä jouduttiin hienosäättämään liikkuvalla alustalta toteutetun mittausession yhteydessä (luku 5.3.1).

5.2.4 Kuvien georeferointi alustakalibroinnin ratkaisun perusteella

Kuvien georeferointi toteutettiin Matlab-pohjaisella funktiolla, joka tekee seuraavat toimenpiteet:

- kuvanimien ja kameran laukaususignaalin ajanhetkien poimiminen QINSy-ohjelmiston uloskirjoittamasta *.qct-tiedostosta
- alustan GNSS/INS-havaintojen interpolointi kuvanottohetkille POSPac-ohjelmistosta uloskirjoitetun tekstitiedostosta, joka sisältää alustan jälkilasketut GNSS/INS-havainnot viiden millisekunnin välein
- kuvien ulkoisten orientointien määrittäminen kuvanottohetkien mukaisista alustan GNSS/INS-havainnoista alustakalibroinnin ratkaisun perusteella
- kuvien ulkoisten orientointien uloskirjoittaminen tekstitiedostoon, jota hyödynnetään myöhemmin Agisoft Photoscan -ohjelmistolla toteutettavassa kuvien yhteensovituksessa.

QINSy-ohjelmiston kautta voidaan uloskirjoittaa *.qct-muotoinen tiedosto, josta selviävät yksittäisten kuvien kuvanottohetket sekä reaaliaikaiset ratkaisut alustan GNSS/INS-havainnoille kuvanottohetkillä (kuva 17). Tällaisen *.qct-tiedoston tiedot veneen reaaliaikaisista GNSS/INS-tiedoista ovat sellaisenaan käyttökelvottomia, koska niissä ei ole huomioitu kameran laukaususignaalin ja todellisen kuvanottohetken välistä latenssia. QINSy-ohjelmiston avulla voidaan tuottaa tiedot veneen reaaliaikaisesti mitatuista GNSS/INS-arvoista 100 millisekunnin välein, mutta arvojen interpoloiminen näin kaukana toisistaan olevista arvoista on epätarkkaa varsinkin silloin, kun vene on kääntymässä, kiihdyttämässä tai hidastamassa vauhtiaan.

```

08:59:43.130,498.D7100.Image,26487683.30,6903286.27,80.57,210.03,2.29,-2.19
08:59:45.834,499.D7100.Image,26487681.39,6903283.85,80.58,202.85,1.97,-2.08
08:59:48.126,500.D7100.Image,26487680.09,6903281.62,80.58,196.59,1.64,-2.17
08:59:50.629,501.D7100.Image,26487678.96,6903279.07,80.57,189.62,2.19,-2.12
08:59:53.125,502.D7100.Image,26487678.17,6903276.41,80.56,182.28,2.00,-2.28
08:59:55.625,503.D7100.Image,26487677.76,6903273.68,80.57,174.20,1.97,-2.10
08:59:58.125,504.D7100.Image,26487677.70,6903270.94,80.57,168.05,2.40,-2.25
09:00:00.625,505.D7100.Image,26487678.00,6903268.23,80.58,163.41,1.92,-1.80
09:00:03.125,506.D7100.Image,26487678.58,6903265.54,80.57,159.19,1.45,-2.41
09:00:05.624,507.D7100.Image,26487679.37,6903262.88,80.58,153.46,1.72,-2.55
09:00:08.124,508.D7100.Image,26487680.40,6903260.29,80.58,146.30,2.37,-2.13
09:00:10.624,509.D7100.Image,26487681.72,6903257.91,80.58,142.21,2.27,-1.83
09:00:13.124,510.D7100.Image,26487683.23,6903255.70,80.59,141.94,1.25,-2.05
09:00:15.629,511.D7100.Image,26487684.83,6903253.47,80.58,139.88,1.94,-2.21
09:00:18.124,512.D7100.Image,26487686.62,6903251.31,80.58,137.36,1.93,-2.18
09:00:20.635,513.D7100.Image,26487688.55,6903249.24,80.57,136.38,2.03,-2.13

```

*Kuva 17. Esimerkki QINSy-ohjelmistosta tuodusta *.qct-tiedostosta. Siinä näkyvät kuvanottohetki UCT-ajassa, kuvan nimi ja veneen reaaliaikaiset tiedot veneen ulkoisesta orientoinnista (X, Y, Z, yaw, roll, pitch) kameran laukaisusignaalin lähettämishetkellä.*

Kuvien georeferoinnin parantamiseksi alustan GNSS/INS-havainnot jälkilasketaan ja interpoloidaan viiden millisekunnin välein POSpac-ohjelmistolla (kuva 18). Kuvien ulkoisten orientointien laskennassa käytetyt veneen jälkilasketut GNSS/INS-arvot interpoloidaan edelleen yhden millisekunnin välein. Interpolointi toteutettiin etsimällä kaksi kuvanottohetkeä ajallisesti lähimpänä olevaa GNSS/INS-arvoa, joita painotettiin käänteisesti kuvanottohetken ja GNSS/INS-arvojen aikaeron perusteella (pienemmälle aikaerolle suurempi painokerroin). Kuvanottohetket määritettiin lisäämällä aikasyntronoinnissa määritetty kameran latenssin arvo kameran laukaisusignaalin aikaan. Esimerkiksi alustan X-koordinaatin interpolointi kuvanottohetkelle tapahtuu seuraavasti:

$$X(t) = \frac{d_2}{d_1+d_2} X_1 + \frac{d_1}{d_1+d_2} X_2 \quad (36)$$

missä

- $X(t)$ on interpoloitu alustan X-koordinaatti kuvanottohetkellä (t)
- X_1 on lähin X-koordinaatti kuvanottohetkeen nähden
- X_2 on toiseksi lähin X-koordinaatti kuvanottohetkeen nähden
- d_1 on kuvanottohetken ja X_1 -koordinaatin havaintohetken aikaero
- d_2 on kuvanottohetken ja X_2 -koordinaatin havaintohetken aikaero


```

9.111952800833,26487559.967593,6903149.943977,78.810756,1.946954,-2.156800,233.350947
9.111954189722,26487559.963743,6903149.941083,78.810699,1.945887,-2.157349,233.351843
9.111955578611,26487559.959889,6903149.938185,78.810640,1.944955,-2.158321,233.352422
9.111956967500,26487559.956034,6903149.935290,78.810581,1.943676,-2.159103,233.354207
9.111958356389,26487559.952179,6903149.932403,78.810523,1.942470,-2.159362,233.355787
9.111959745556,26487559.948327,6903149.929522,78.810466,1.941225,-2.159276,233.356139
9.111961134445,26487559.944478,6903149.926644,78.810410,1.939487,-2.158736,233.357525
9.111962523333,26487559.940631,6903149.923765,78.810356,1.938303,-2.158613,233.358439
9.111963912222,26487559.936783,6903149.920878,78.810300,1.936708,-2.158286,233.359419
9.111965301111,26487559.932931,6903149.917984,78.810243,1.934973,-2.159160,233.361163
9.111966690000,26487559.929076,6903149.915085,78.810184,1.933920,-2.160185,233.362137
9.111968078889,26487559.925218,6903149.912186,78.810123,1.932770,-2.161068,233.363300
9.111969467778,26487559.921360,6903149.909294,78.810064,1.931632,-2.161369,233.364822
9.111970856667,26487559.917504,6903149.906409,78.810005,1.930305,-2.161411,233.366678
9.111972245556,26487559.913652,6903149.903529,78.809949,1.928866,-2.160974,233.366944
9.111973634445,26487559.909801,6903149.900648,78.809894,1.927182,-2.160410,233.366503
9.111975023334,26487559.905951,6903149.897762,78.809840,1.925574,-2.160289,233.368485
9.111976412222,26487559.902097,6903149.894867,78.809785,1.924151,-2.160962,233.370387

```

Kuva 18. Esimerkki POSPac-ohjelmiston avulla jälkilasketuista alustan GNSS/INS-havainnoista. Tekstitiedostossa näkyvät veneen jälkilasketut GNSS/INS-arvot viiden millisekunnin välein (UCT-aika tunteina, X, Y, Z, roll, pitch, yaw).

Kuvien ulkoiset orientoinnit määritettiin kuvanottohetkien mukaisten alustan GNSS/INS-havaintojen ja alustakalibroinnin ratkaisun perusteella. Laskennassa käytettiin yhtälöiden 17-18 mukaisia kaavoja (luku 3.2.1). Lopulta kuvien ulkoiset orientoinnit uloskirjoitettiin tekstitiedostoon Agisoft Photoscan -ohjelmiston ymmärtämään muotoon (kuva 19).

```

498.D7100.Image.jpg,26487683.114482,6903286.036856,80.595514,300.697909,78.927918,2.265566
499.D7100.Image.jpg,26487681.237185,6903283.592649,80.596590,293.865892,79.280944,2.597505
500.D7100.Image.jpg,26487679.961526,6903281.361643,80.596342,287.139913,79.357867,2.146849
501.D7100.Image.jpg,26487678.858578,6903278.793758,80.595382,280.030169,78.796387,1.994779
502.D7100.Image.jpg,26487678.120630,6903276.123188,80.598697,271.677108,79.431098,1.148636
503.D7100.Image.jpg,26487677.735784,6903273.395602,80.612162,266.066939,79.133733,3.433731
504.D7100.Image.jpg,26487677.723700,6903270.645863,80.608978,257.168570,78.932719,0.530465
505.D7100.Image.jpg,26487678.047148,6903267.957424,80.626005,255.904559,79.095979,3.821827
506.D7100.Image.jpg,26487678.652929,6903265.285391,80.619567,251.971388,79.670116,4.075814
507.D7100.Image.jpg,26487679.472272,6903262.612506,80.603761,241.148109,79.601375,-0.707979
508.D7100.Image.jpg,26487680.542902,6903260.051626,80.595789,235.674871,79.283745,0.816318
509.D7100.Image.jpg,26487681.874533,6903257.686621,80.597985,233.050853,78.917546,1.892725
510.D7100.Image.jpg,26487683.389651,6903255.479395,80.607950,233.543869,79.772584,2.706649
511.D7100.Image.jpg,26487685.020815,6903253.247581,80.598375,231.165769,79.200051,2.484072
512.D7100.Image.jpg,26487686.814085,6903251.085359,80.595330,228.292064,79.142155,2.046870
513.D7100.Image.jpg,26487688.770014,6903249.012401,80.592916,227.080240,79.173016,1.638917

```

Kuva 19. Esimerkki Agisoft Photoscan -ohjelmistoon vietävästä tekstitiedostosta, joka sisältää tiedot kuvien ulkoisista orientoinneista. Tiedostossa näkyvät kuvan nimi ja alustakalibroinnin perusteella lasketut kuvien ulkoiset orientoinnit (X, Y, Z, yaw, pitch, roll).

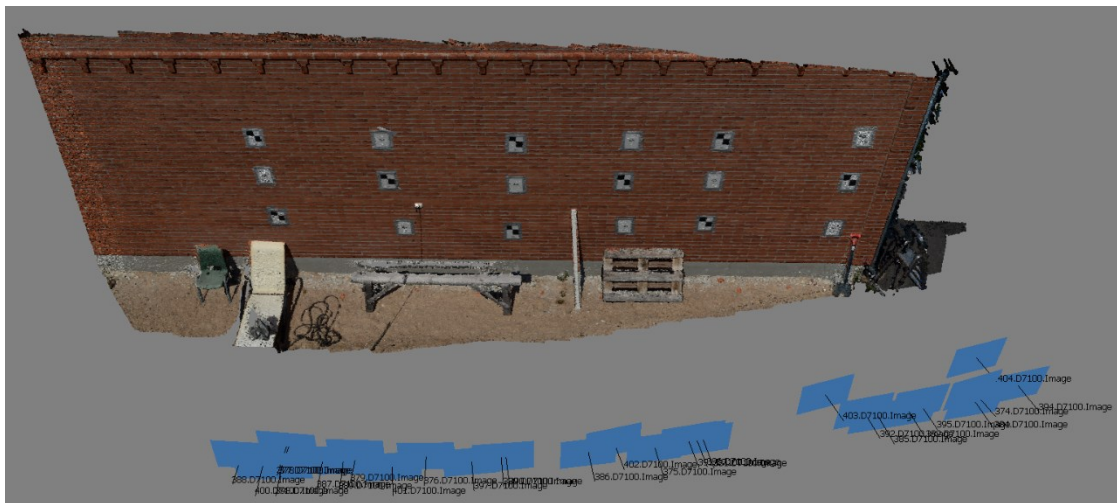
5.3 Tutkimuskohteet ja tutkimusmenetelmät

Tässä työssä tehtiin kaksi maastotestiä. Ensimmäisessä tutkimuskohteena toimi jo alustakalibroinnissa käytetty tiiliseinän ympäristö. Tämän testin tarkoituksena olivat aikasyntroinnin hienosäätö sekä kuvien georeferoinnin ja liikkuvan kartoituksen tarkkuuksien estimointi. Määritettyjen kuvien georeferoinnin ja kohteiden kartoituksen tarkkuuksien avulla voidaan arvioida järjestelmäkallibroinnin onnistumista. Toinen maastotesti toteutettiin Jyväskylän Jyväsjärvellä, jossa mallinnuskohteena toimi Kuokkalan silta ja sen urbaani lähiym-

päristö. Testin päätavoitteena oli mallintaa testiympäristö kuva-aineiston perusteella värjättyllä laserpistepilvellä ja tutkia kuva- ja laserkeilausaineistojen yhteensovittamisen tarkkuutta. Molemmista maastotesteissä käytettiin kameran kalibrointiparametreina ja alustakalibroinnin parametreina luvussa 5.2 esitettyjen menetelmien avulla saatuja ratkaisuja.

5.3.1 Tiiliseinä-testikenttä

Kuvien georeferoinnin ja 3D-rekonstruoinnin tarkkuuden määrittämistä varten suoritettiin mittausessio, jonka testikenttänä toimi tiiliseinä ja sen lähiympäristö sekä jo alustakalibroinnin yhteydessä tiiliseinälle mitatut 18 tähystä. Testikentästä otettiin kuvia kolmelta edestakaiselta, hieman kaarevalta mittauslinjalta, joiden sijainnit olivat samankaltaiset. Yhteenlaskettu kuvien lukumäärä oli 28. Tiiliseinä-testikenttää päädyttiin käyttämään myös kameran ja QINSy-ohjelmiston välisessä aikasykronoinnissa. Kameran asetuksina käytettiin 1/640 sekunnin suljinnopeutta ja automaattista ISO-arvon määrittystä. ISO-arvot kuvienottohetkillä olivat välillä 200-250. Kameran etäisyys tiiliseinästä oli noin 5-10 metriä.



Kuva 20. Kuvausgeometria ja testikohde kuvien georeferoinnin ja 3D-rekonstruoinnin tarkkuuden määrittämistä varten tehdyssä maastotestissä.



Kuva 21. Esimerkkikuvia tiiliseinän ympäristössä toteutetun maastotestin yhdeltä mittauslinjalta.

Tiiliseinä-testikentästä otetut kuvat georeferoitiin ensin suoraan alustan GNSS/INS-havainnoista luvussa 5.2.4 esitettyllä tavalla ("alkuperäinen kuva-aineisto"). Kuvien ulkoisten orientointien lähtöarvojen laskemisen jälkeen kuvien ulkoisen orientoinnin parametreja parannettiin kuvien yhteensovituksen avulla ("tasoitettu kuva-aineisto"). Aikasykronoinnin hienosäätöä varten alkuperäinen ja tasoitettu kuva-aineisto luotiin moneen kertaan käyttäen

erilaisia kameran latenssin arvoja. Kuvien georeferoinnin ja kuvista tapahtuvan 3D-rekonstruoinnin tarkkuuksien määrittämisessä käytettiin optimaaliseksi kameran latenssiksi määritettyä arvoa.

Tasoitettu kuva-aineisto luotiin Agisoft Photoscan -ohjelmistolla toteutetulla sädekimpputasoituksella, jossa kameran kalibrointiparametreja käsiteltiin tunnettuina ja kuvien ulkoisten orientointien lähtöarvoina käytettiin alustan GNSS/INS-havaintojen ja alustakalibroinnin ratkaisun perusteella määritettyjä arvoja. Tiiliseinällä näkyviä tähyksiä ei hyödynnetty kuvien yhteensovituksessa.

Tasoitettun kuva-aineiston luonnissa käytettiin seuraavia asetuksia:

- Kuvien yhteensovituksen tarkkuus: ”Highest”
 - Kuvien koot määritetään kaksinkertaiseksi alkuperäisiin verrattuna
- Kuvaparien esivalinta: ”Reference preselection”
 - Kuvaparien esivalinta toteutetaan kuvien ulkoisten orientointien lähtöarvojen perusteella
- Avainpisteiden maksimimäärä: 120 000
- Liitospisteiden maksimimäärä: 12 000

Sädekimpputasoituksen painoarvoiksi määritettiin:

- Projektiokeskusten sijaintitarkkuus: 5 cm
- Kiertoasemien tarkkuus: $0,5^\circ$ (käytössä ω -, ϕ -, κ -kiertokulmat)
- Liitospisteiden pikselitarkkuus: 1 pikseli

Lisäksi Tiiliseinä-testikentästä otettujen kuvien avulla luotiin referenssiaineistot kuvien georeferoinneille ja kartoitettavien kohteiden sijainneille. Referenssiaineiston ulkoiset orientoinnit määritettiin käänteisellä georeferoinnilla käyttäen kontrollipisteinä tiiliseinän 18 signaloitua tähytä, joiden 3D-koordinaatit olivat geodeettisesti mitattuja. Käänteinen georeferointi toteutettiin Agisoft Photoscan -ohjelmistolla samoin asetuksin kuin yllä kuvattu tasoitettu kuva-aineisto, mutta alustan GNSS/INS-havainnoista lasketuille kuvien ulkoisten orientointien lähtöarvoille ei annettu tasoitusprosessissa ollenkaan painoarvoa. Kuvien ulkoiset orientoinnit määritettiin siis puhtaasti signaloitujen tähysten ja kuvien välisten liitospisteiden kuvakoordinaatteihin perustuen.

Referenssiaineistolle käytettiin seuraavia painokertoimia:

- Tähysten sijaintitarkkuus kohdekoordinaatistossa: 5 mm
- Tähysten pikselitarkkuus kuvatasolla: 0,1 pikseliä
- Liitospisteiden pikselitarkkuus: 1 pikseli

Aikasynkronoinnin hienosäätämisessä kameran latenssin lähtöarvoksi määritettiin karkeassa aikasynkronoinnissa saatu tulos. Kameran latenssia säädettiin iteratiivisesti kokeilemalla, kunnes löydettiin optimaalinen arvo kuvien georeferoinnin sisäisten virheiden minimoimiseksi kuvien yhteensovituksessa. Käytetyn menetelmän avulla kameran latenssille löydetään oikeastaan kaksi optimiarvoa: toisessa on minimoitu kuvien projektiokeskusten sijaintien virheet, toisessa kiertoasemien virheet.

Kuvien georeferoinnin tarkkuutta arvioitiin vertaamalla Tiiliseinä-testikentästä otettuja alkuperäisen ja tasoitettun kuva-aineiston ulkoisia orientointeja referenssiaineiston ulkoisiin orientointeihin. Kohteiden kartoituksen absoluuttisen sijaintitarkkuuden määrittäminen toteutettiin puolestaan vertaamalla tasoitetusta kuva-aineistosta fotogrammetrisesti määritettyjä tähtysten 3D-koordinaatteja geodeettisesti mitattuihin arvoihin.

5.3.2 Kuokkalan silta

Jyväskylän Jyväsjärvellä sijaitseva Kuokkalan silta ja sen urbaani lähiympäristö (kuvat 22-23) toimivat mallinnuskohteena testissä, jonka päätavoitteena oli mallintaa testiympäristö värjätyllä laserpistepilvellä ja tutkia kuva- ja laserkeilausaineistojen yhteensovittamisen tarkkuutta. Testikohteen laserkeilaus ja kuvien ottaminen jouduttiin suorittamaan erikseen, koska kameran jalusta asetettiin alustakalibroinnin yhteydessä liian lähelle laserkeilaimen paikkaa, eivätkä sensorit mahtuneet samanaikaisesti jalustoilleen. Kameran asetuksina käytettiin 1/640 sekunnin suljinnopeutta ja kameran automaattisesti määrittämää ISO-arvoa, joka vaihteli välillä 200-280. Kuvausolosuhteet olivat mittausession aikana erinomaiset: testi suoritettiin kokonaisuudessaan aurinkoisessa ja tyynessä säässä.

Kuva- ja laserkeilausaineistot georeferoitiin POSPac-ohjelmistolla suoritettun jälkilaskennan avulla. Jälkilaskennan statistiikka on esitetty liitteessä 1.



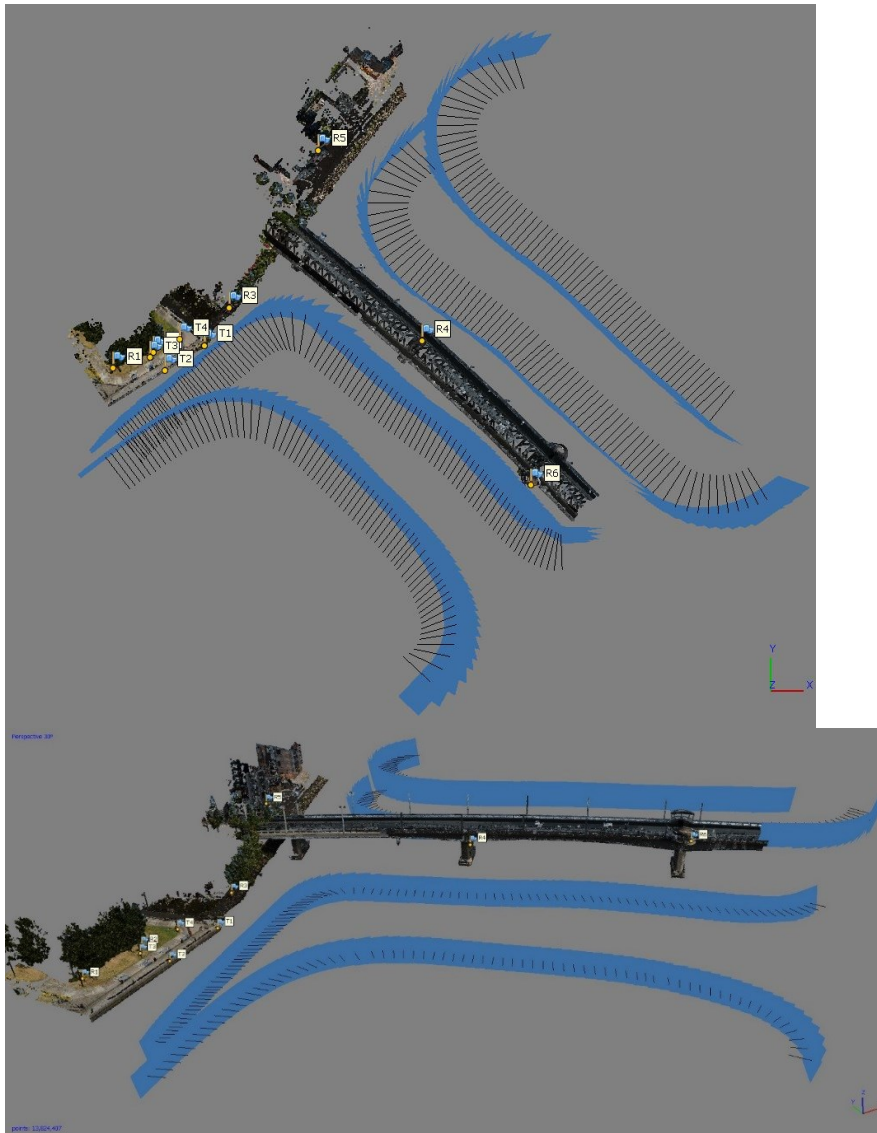
Kuva 22. Mallinnettava alue Google Maps -palvelussa kuvattuna. Mallinnettaviin kohteisiin kuului Kuokkalan silta ja kuvassa näkyvät lähellä rantaa näkyvät kohteet.



Kuva 23. Kuvia Lutakon mallinnettavasta alueesta. Erilaiset kyltit ja kirjaimet tarjosivat hyviä referenssipisteitä. Kuvien ja laserpistepilven yhteensovittamisessa käytettiin neljää signaloitua tähestä, jotka näkyvät ylimmässä kuvassa. Tähtysten koordinaatteja ei mitattu geodeettisesti.

Kuvien ja laserkeilausaineiston yhteensovittamista varten Kuokkalan sillan ympäristöön asetettiin neljä tähestä (T1-T4), joita käytettiin yhteensovituksen liitospisteinä. Lisäksi testiympäristön luonnollisista kohteista määritettiin kuusi tarkistuspistettä (R1-R6) aineistojen yhteensovittamisen tarkkuuden tutkimiseksi.

Liitos- ja tarkistuspisteiden sijainnit sekä kuvausession mittauslinjat näkyvät kuvassa 24. Lähempien mittauslinjojen etäisyydet liitos- ja tarkistuspisteistä olivat noin 15-35 metriä ja kauempien noin 40-60 metriä. Laserkeilauksen mittauslinjat olivat samankaltaiset, mutta Kuokkalan sillan eteläpuolella oli kaksi ylimääräistä, vastakkaisiin suuntiin ajettua mittauslinjaa, joita käytettiin laserkeilaimen kalibrointia varten.



Kuva 24. Mallinnus Kuokkalan sillan ympäristöstä. Kuvissa näkyvät väritetty laserpistepilvi, kamera-asemien sijainnit, kuvien ja laserpisteiden yhteensovituksessa käytetyt liitospisteet T1-T4 ja tulosten arvioinnissa käytetyt tarkistuspisteet R1-R6.



Kuva 25. Kuokkalan silta läheltä ja kaukaa. Kameran pienestä pitch-kulmasta johtuen sillan yläosa näkyy vain riittävän kaukaa otetuilta kuvilta.

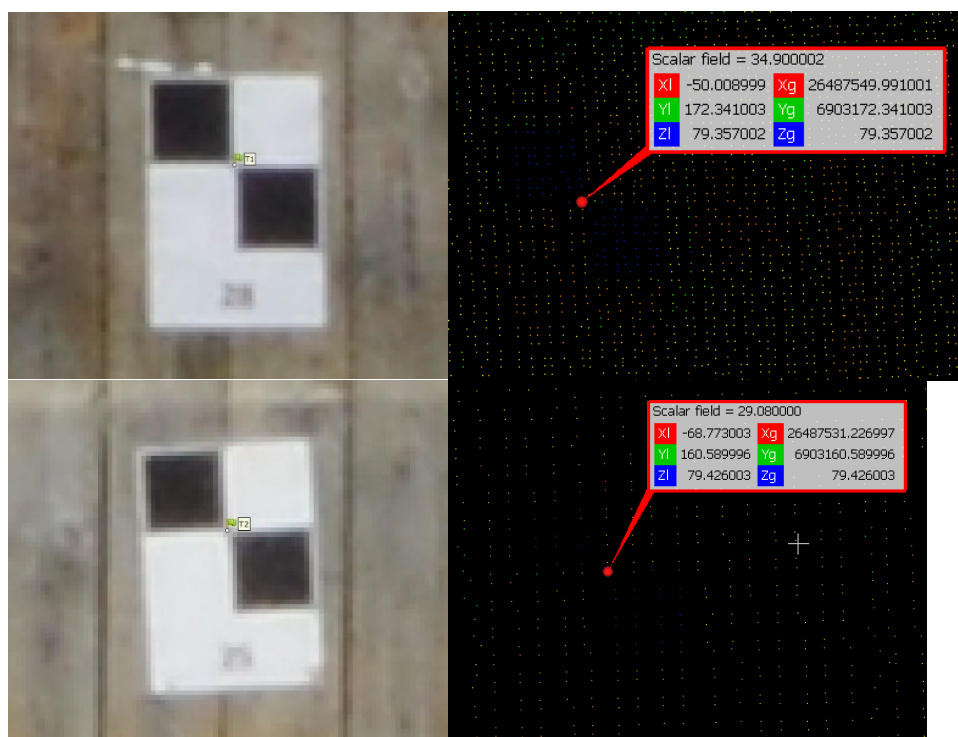
Agisoft Photoscan -ohjelmistolla toteutettu kuvien yhteensovittaminen toteutettiin seuraavilla asetuksilla:

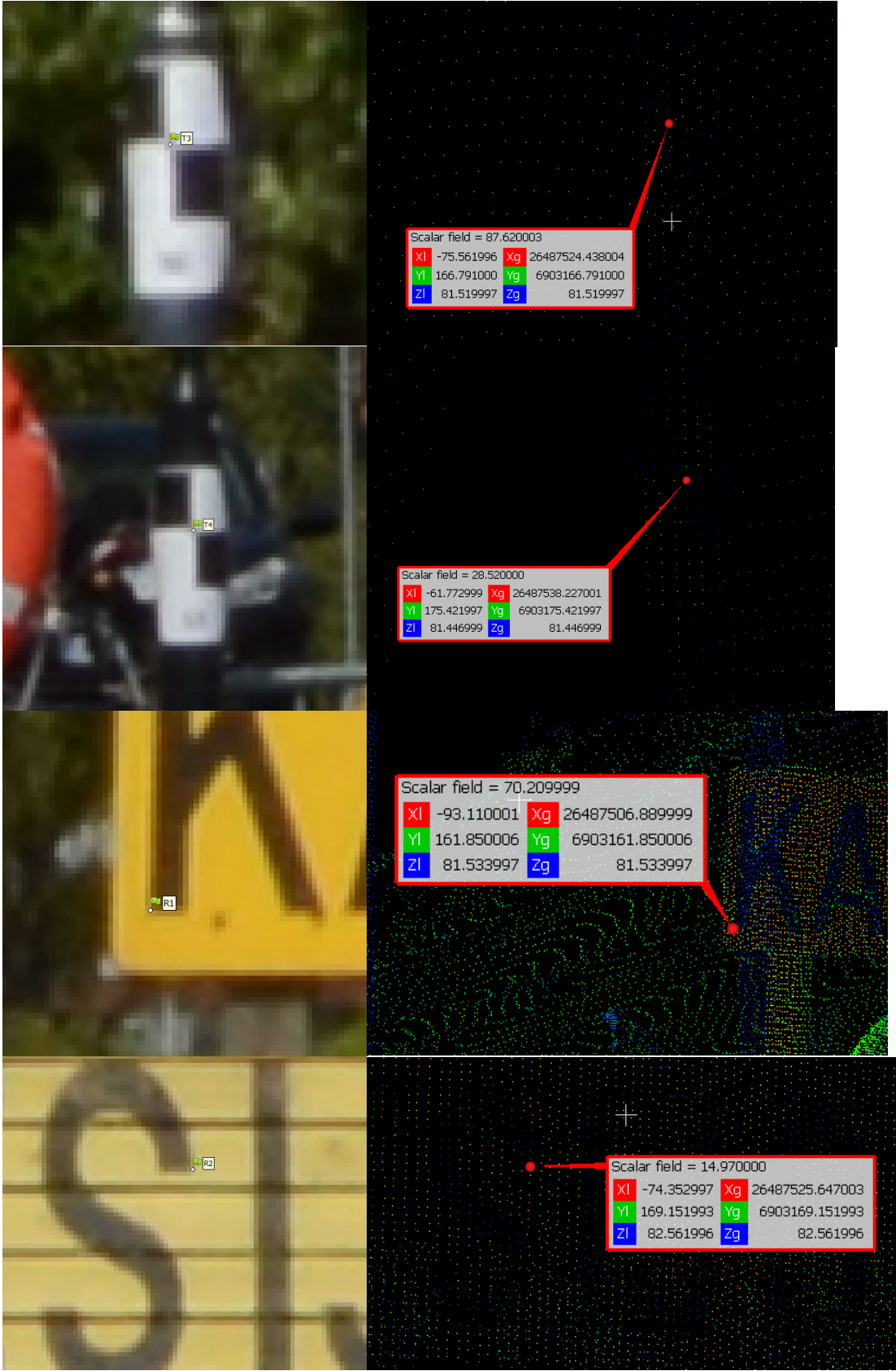
- Kuvien yhteensovituksen tarkkuus: "Highest"
- Kuvaparien esivalinta: "Reference preselection"
- Avainpisteiden maksimimäärä: 120 000
- Liitospisteiden maksimimäärä: 12 000

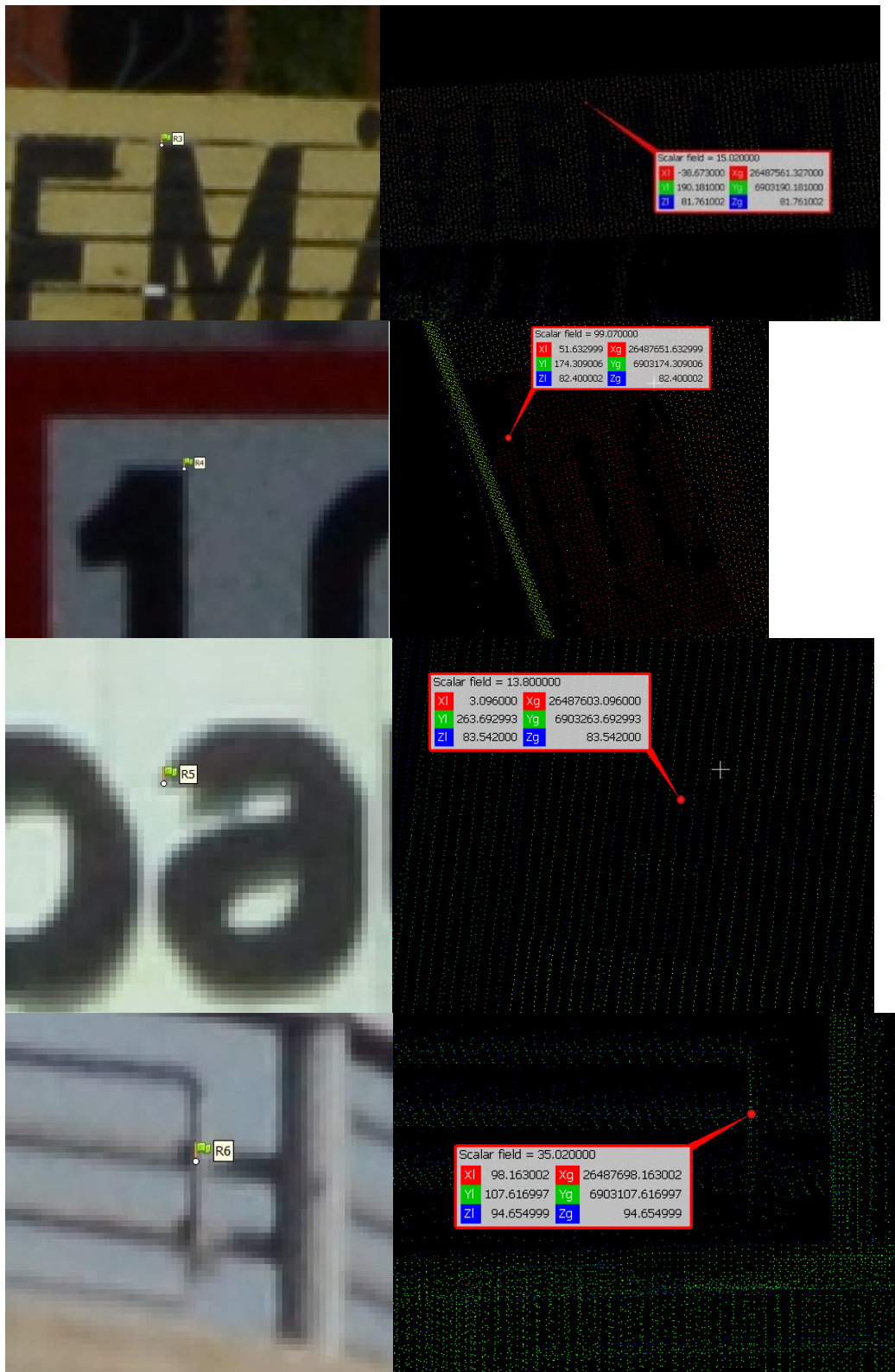
Sädekimpputasoituksen painoarvoiksi määritettiin:

- Projektiokeskusten sijaintitarkkuus: 5 cm
- Kiertoasemien tarkkuus: 0,5° (käytössä ω -, ϕ -, κ -kiertokulmat)
- Liitospisteiden pikselitarkkuus: 1 pikseli

Tähysten ja referenssipisteiden 3D-koordinaattien arvot määritettiin sekä tasoitetusta kuva-aineistosta että laserpistepilvestä. Agisoft Photoscan -ohjelmisto tunnisti tähykset T1 ja T2 automaattisesti, mutta tähysten T3 ja T4 automaattinen tunnistaminen epäonnistui todennäköisesti kaarevista kiinnityspinnoista (katuvalopylväät) johtuen. Tähykset T3 ja T4 sekä tarkistuspisteet R1-R6 mitattiin kuvilta manuaalisesti. Laserpistepilven osalta kaikkien tähysten ja tarkistuspisteiden 3D-koordinaateiksi määritettiin visuaalisella tarkastelulla lähin mahdollinen piste. Visuaalista tarkastelua helpotti laserpistepilven värittäminen intensiteettiarvojen perusteella. Kuvat yksittäisistä tähyksistä ja niitä vastaavista laserpisteistä näkyvät kuvassa 26.



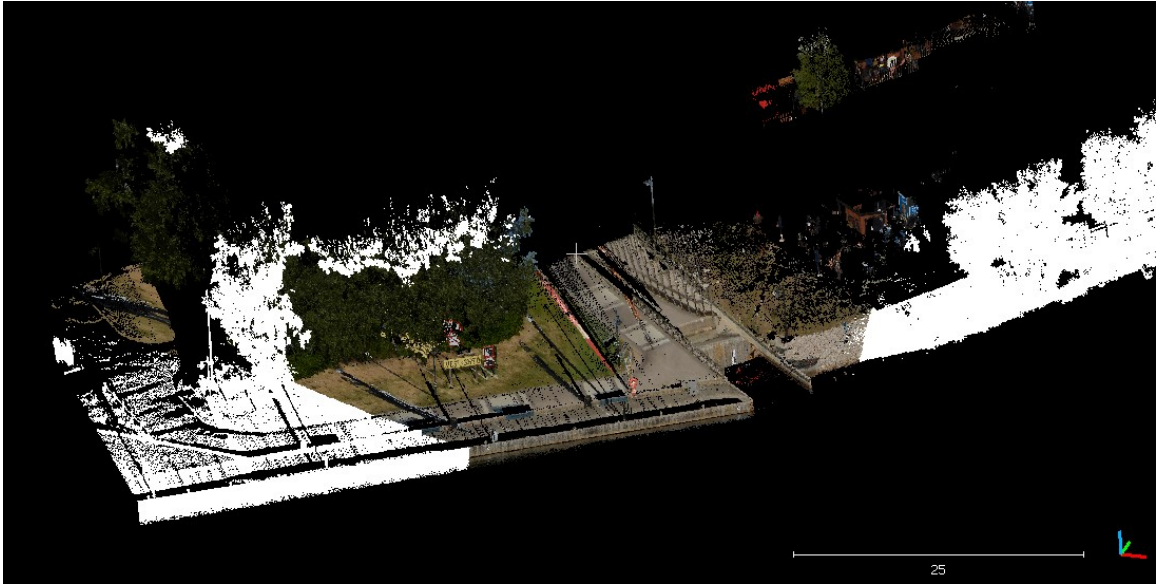




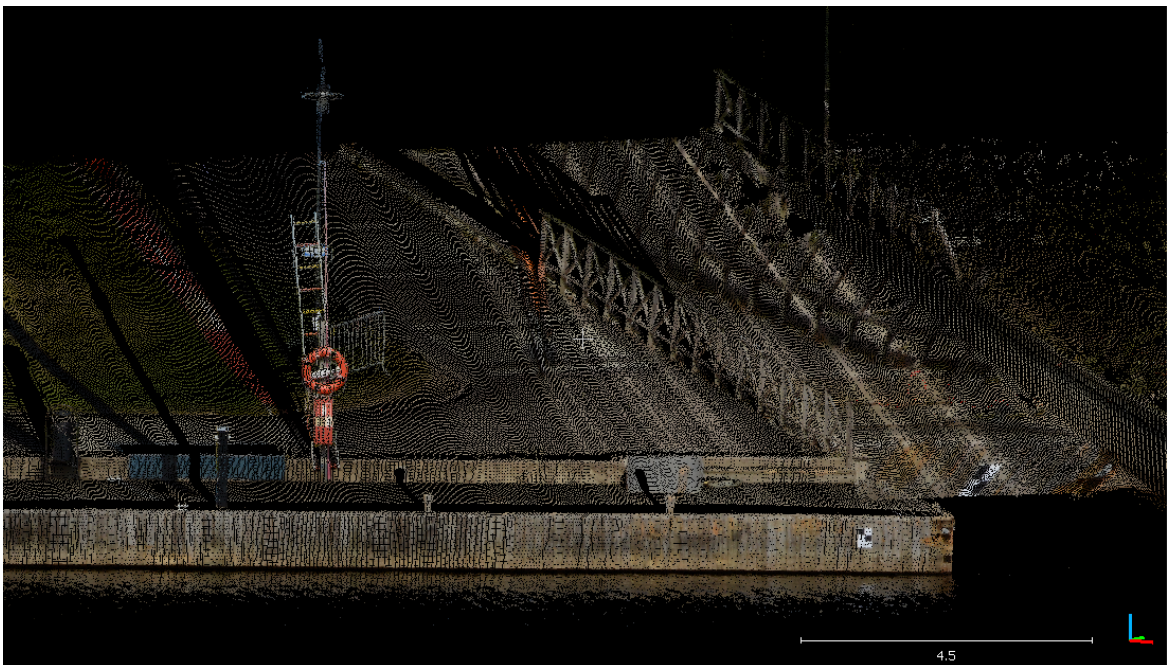
Kuva 26. Yksittäisten tähysten määrittäminen kuva- ja laserkeilausaineistosta.

Kuvien ja laserkeilausaineiston yhteensovituksessa kuva-aineistosta fotogrammetrisesti mitatut tähykset määritettiin referenssiaineistoksi, joiden perusteella laserpistepilvelle suoritettiin luvussa 4.2 esitetty yhdenmuotoisuusmuunnos CloudCompare-ohjelmistolla. Laserpis-

tepilven mittakaava säilytettiin muunnoksessa ennallaan. Laserpistepilven värjäämistä varten toteutettiin Matlab-funktio, joka yksi kuva kerrallaan projisoi laserpisteet kuvatasolle. Funktion toiminta perustuu yhtälössä 8 esitettyihin linssivirheiden korjausparametreilla laajennettuihin kollineaarisuusyhtälöihin. Kuvatason pikseli, jolla projisoitu laserpiste sijaitsee, määrittää laserpisteen RGB-väriarvot. Mikäli projisoitu laserpiste on kuva-alueen ulkopuolella, ei väriarvoja määritetä.



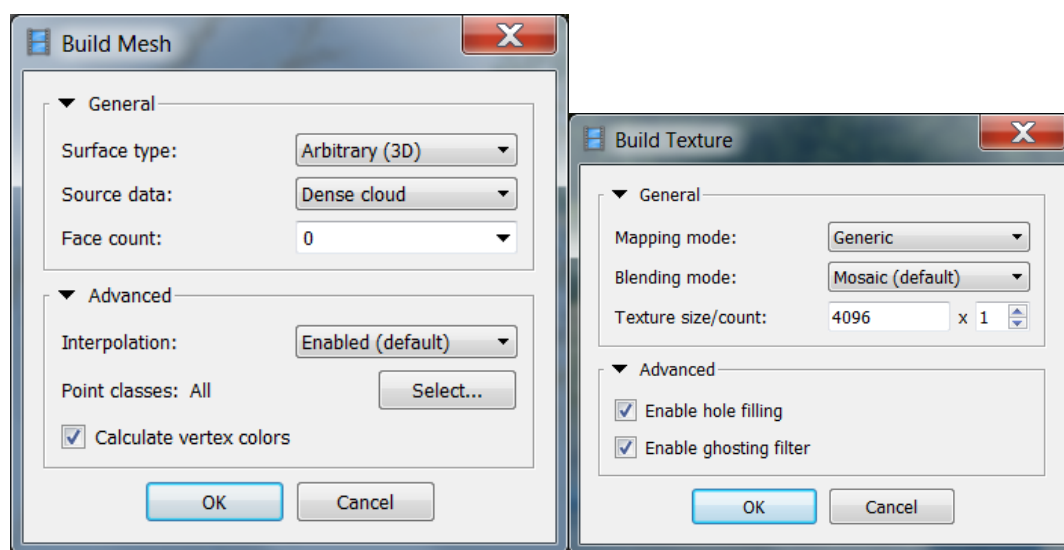
Kuva 27. Väriarvojen määrittäminen laserpisteille yksittäiseltä kuvalta. Valkoisille laserpisteille ei ole kyetty määrittämään väriarvoja, koska ne ovat kuva-alueen ulkopuolella.



Kuva 28. Väriarvojen määrittäminen laserpisteille yksittäiseltä kuvalta. Joidenkin pisteiden väriarvot ovat heijastuneet kameran ja pisteen välissä olevista kohteista (mukaan lukien liikkuvat kohteet).

Tässä työssä laserpisteiden väriarvojen määrittämistä varten luotu Matlab-ohjelma tuottaa kuvien lukumäärän mukaisen määrän yksittäisten kuvien perusteella väritettyjä pistepilviä, joista on suodatettu pois kuva-alueen ulkopuoliset pisteet. Ennen väripistepilvien yhdistämisestä pistepilviltä poistettiin CloudCompare-ohjelmiston segmentointityökalulla manuaalisesti sellaiset pisteet, joiden väriarvot olivat todellisuudessa heijastuneet pisteen ja kameran välissä olevista kohteista. Myös kuvien valinta väriarvojen määrittämiseen toteutettiin tässä työssä manuaalisesti visuaalisen tarkastelun perusteella. Väripistepilvien yhdistäminen toteutettiin yksitellen väripistepilvi kerrallaan CloudComparen Merge-työkalulla.

Laserpistepilven värittämisen lisäksi kokeiltiin laserpisteistä koostuvan 3D-mallin teksturointia kuva-aineiston avulla. 3D-malli ja sen teksturointi toteutettiin Agisoft Photoscan -ohjelmiston ”Build Mesh”- ja ”Build Texture”-työkaluilla käyttämällä kaikkia mahdollisia laserpisteitä. Käytetyt asetukset näkyvät kuvassa 29.



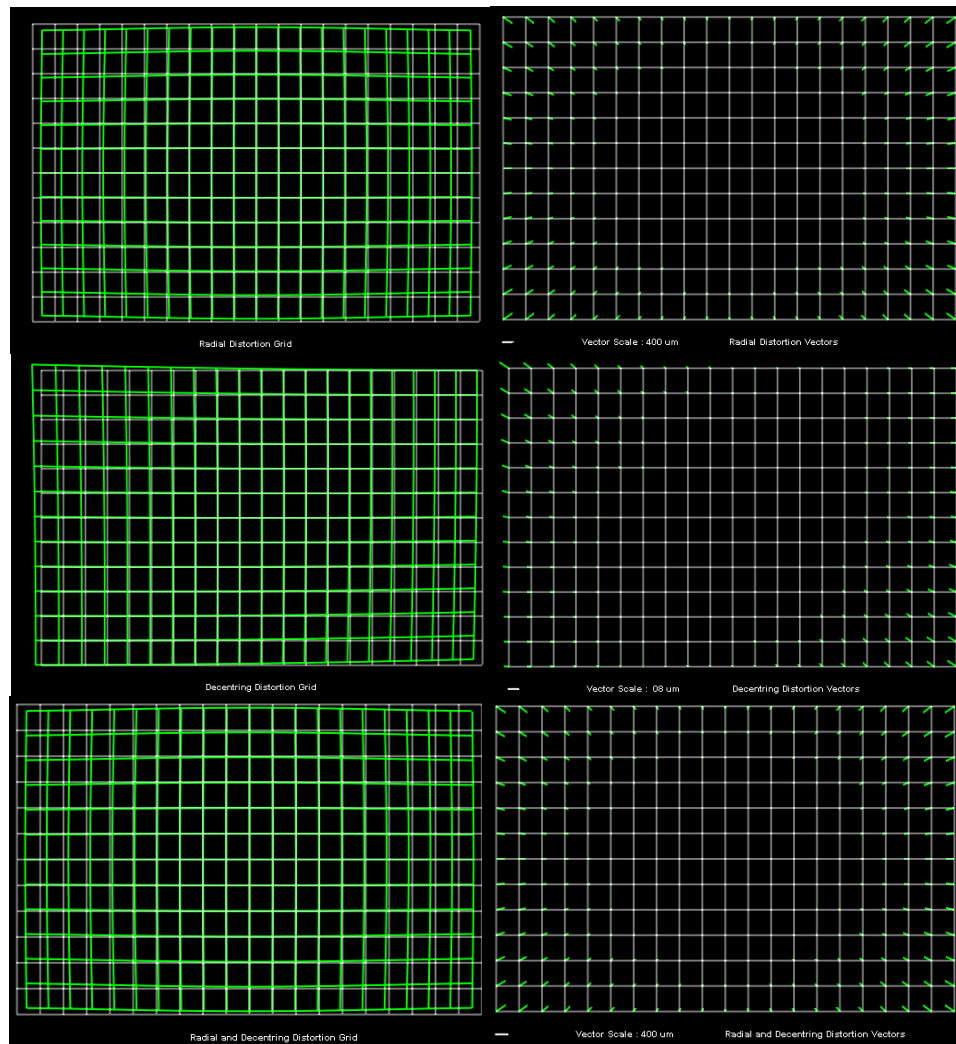
Kuva 29. 3D-pintamallin luomisessa ja teksturoinnissa käytetyt asetukset.

6 Tulokset

6.1 Järjestelmäkalibroinnin tulokset

Taulukko 6. Kameran kalibrointiparametrien keskiarvot eri kalibrointimenetelmissä. Matlab- ja OpenCV-menetelmät jakavat kameravakion kahteen komponenttiin.

Menetelmä	c_x	c_y	x_0	y_0	k_1	k_2	k_3	p_1	p_2
Matlab	4248,925	4248,647	-12,807	-4,489	-0,0820	0,0611	-0,0087	$8,940e^{-5}$	$-2,786e^{-4}$
OpenCV	4247,336	4247,336	-15,955	-4,025	-0,0806	0,0578	-0,0131	$-1,566e^{-3}$	$-5,436e^{-4}$
Agisoft PS	4232,814	-	-11,342	0,390	-0,0835	0,0876	-0,0392	$-2,250e^{-4}$	$-1,580e^{-4}$
iWitness	4246,371	-	3,904	-5,073	-0,0833	0,0733	-0,0309	$-3,793e^{-4}$	$-2,136e^{-4}$



Kuva 30. iWitness-kalibroinnin radiaalisen ja tangentialisen (epäkeskisyyden) piirtovirheiden havainnollistaminen ruudukon ja suuntavektorien avulla.

Taulukko 7. Kuvahavaintojen residuaalit pikseleinä sekä kameran kalibrointiparametrien keskihajonnat eri kalibrointimenetelmissä.

Menetelmä	RMS_{pix}	σ_{c_x}	σ_{c_y}	σ_{x_0}	σ_{y_0}	σ_{k_1}	σ_{k_2}	σ_{k_3}	σ_{p_1}	σ_{p_2}
Matlab	0.971	2.311	2.762	4.250	4.456	$3.518e^{-3}$	0.0119	0.0175	$4.038e^{-4}$	$4.136e^{-4}$
OpenCV	0.968	4.615	5.064	2.564	7.140	$7.307e^{-4}$	0.0050	0.0121	$3.228e^{-3}$	$1.658e^{-4}$
Agisoft PS	0.836	1.191	-	0.625	0.049	$2.334e^{-4}$	$1.642e^{-3}$	$1.491e^{-3}$	$3.845e^{-5}$	$2.075e^{-5}$
iWitness	0.273	0.729	-	0.576	1.570	$2.559e^{-3}$	$7.414e^{-3}$	$6.839e^{-3}$	$1.341e^{-5}$	$2.095e^{-4}$

Taulukko 8. Kalibrointikuvan ulkoisen orientoinnin määrittäminen eri kameran kalibrointimenetelmillä.

Menetelmä	X_0 (m)	Y_0 (m)	Z_0 (m)	yaw (°)	pitch (°)	roll (°)
Matlab	26479394.718	6906003.918	150.387	316.8826	83.7283	1.4121
OpenCV	26479394.719	6906003.917	150.388	316.8593	83.7236	1.3857
Agisoft PS	26479394.701	6906003.934	150.382	316.8952	83.7275	1.4231
iWitness	26479394.715	6906003.920	150.385	316.8700	83.7311	1.3980

Taulukko 9. Kameran kalibrointimenetelmien väliset erot kalibrointikuvan ulkoisen orientoinnin määrittämisessä. Vasemmassa alakulmassa näkyvät projektiokeskuksen sijaintien väliset erot millimetreinä eri menetelmin hankittuja kalibrointiparametreja käytettäessä. Oikeassa yläkulmassa näkyvät puolestaan erot kalibrointikuvan kiertoaseman määrittämisessä asteina.

	Matlab	OpenCV	Agisoft PS	iWitness
Matlab	-	0,0355°	0,0168°	0,0191°
OpenCV	1,97 mm	-	0,0520°	0,0179°
Agisoft PS	23,84 mm	25,32 mm	-	0,0358°
iWitness	4,55 mm	6,32 mm	19,45 mm	-

Taulukko 10. Kameran kalibroinnin vaikutus kalibrointikuvan ulkoisen orientoinnin määrittämisen tarkkuuteen kohdekoordinaatistossa. Viimeinen sarake σ_{ypr} tarkoittaa kokonaiskulmavirhettä.

Menetelmä	σ_{xy} (mm)	σ_z (mm)	σ_{xyz} (mm)	σ_{yaw} (°)	σ_{pitch} (°)	σ_{roll} (°)	σ_{ypr} (°)
Matlab	5,08	0,535	5,11	0,0178	$2,83e^{-3}$	0,0212	0,0279
OpenCV	8,98	0,807	9,02	0,0391	0,0104	0,0432	0,0592
Agisoft PS	2,11	0,399	2,14	$4,17e^{-3}$	$6,37e^{-4}$	$4,50e^{-3}$	$6,17e^{-3}$
iWitness	3,44	1,01	3,59	$1,02e^{-3}$	$3,59e^{-3}$	$6,10e^{-3}$	$7,16e^{-3}$

Taulukko 11. Tähyksistä tehtyjen kuvahavaintojen vaikutus kalibrointikuvan ulkoisen orientoinnin määrittämisessä kohdekoordinaatiston suhteen. Testissä yksi tähyksistä jätettiin kerrollaan ulkoisen orientoinnin laskennan ulkopuolelle. Kameran kalibrointiparametreina käytettiin ”Agisoft PS”-menetelmällä tuotettuja ratkaisuja.

Poistettu tähyks	RMS_{pix}	X_0 (m)	Y_0 (m)	Z_0 (m)	yaw (°)	pitch (°)	roll (°)
Ei poistettuja	0.487	26479394.7028	6906003.9326	150.3826	316.8826	83.7283	1.4121
1	0.495	26479394.7031	6906003.9326	150.3827	316.8922	83.7269	1.4210
2	0.480	26479394.7030	6906003.9326	150.3827	316.8804	83.7264	1.4087
3	0.497	26479394.7028	6906003.9327	150.3827	316.8908	83.7267	1.4184
4	0.461	26479394.7028	6906003.9327	150.3826	316.8803	83.7278	1.4088
5	0.491	26479394.7028	6906003.9325	150.3826	316.8920	83.7272	1.4189
6	0.471	26479394.7027	6906003.9322	150.3825	316.8693	83.7286	1.3941
7	0.495	26479394.7031	6906003.9327	150.3827	316.8988	83.7270	1.4277
8	0.497	26479394.7028	6906003.9326	150.3827	316.8858	83.7267	1.4132
9	0.478	26479394.7029	6906003.9327	150.3826	316.8902	83.7271	1.4181
10	0.498	26479394.7029	6906003.9326	150.3826	316.8909	83.7271	1.4184
11	0.493	26479394.7029	6906003.9328	150.3827	316.8952	83.7266	1.4238
12	0.480	26479394.7028	6906003.9323	150.3827	316.8836	83.7267	1.4089
13	0.497	26479394.7030	6906003.9327	150.3827	316.8987	83.7270	1.4274
14	0.494	26479394.7029	6906003.9326	150.3827	316.8883	83.7264	1.4164
15	0.484	26479394.7028	6906003.9326	150.3827	316.8854	83.7260	1.4123
16	0.494	26479394.7029	6906003.9327	150.3826	316.8928	83.7273	1.4212
17	0.486	26479394.7029	6906003.9325	150.3828	316.8931	83.7256	1.4201
18	0.496	26479394.7029	6906003.9326	150.3827	316.8956	83.7261	1.4232
19	0.479	26479394.7028	6906003.9332	150.3827	316.9052	83.7263	1.4348
20	0.495	26479394.7030	6906003.9328	150.3827	316.8914	83.7272	1.4203
21	0.493	26479394.7029	6906003.9327	150.3828	316.8906	83.7258	1.4188
22	0.449	26479394.7033	6906003.9328	150.3823	316.9018	83.7289	1.4318
23	0.499	26479394.7029	6906003.9326	150.3826	316.8922	83.7273	1.4199
24	0.452	26479394.7015	6906003.9328	150.3817	316.8804	83.7352	1.4318
Keskiarvo	0.4856	26479394.7029	6906003.9327	150.3826	316.8902	83.7272	1.4191

Taulukko 12. Tähyksistä tehtyjen kuvahavaintojen residuaalit kaikkien 24 tähyksen avulla suoritettussa kalibrointikuvan ulkoisessa orientoinnissa. Kameran kalibrointiparametreina käytettiin ”Agisoft PS”-menetelmällä tuotettuja ratkaisuja.

Tähyks	Δx (pikseliä)	Δy (pikseliä)
1	0,375	0,235
2	-0,091	-0,188
3	0,834	0,360
4	0,145	0,208
5	-0,156	-0,568
6	0,235	0,508
7	1,129	0,439
8	-0,342	0,017
9	-0,525	-0,530
10	-0,118	0,453
11	-0,558	-0,163
12	-0,784	0,282
13	0,288	-0,403
14	-0,215	-0,611
15	-0,091	-0,344
16	0,264	-0,131
17	0,237	-0,126
18	-0,027	-0,465
19	-0,243	-0,734
20	-0,068	1,061
21	0,355	0,021
22	0,334	0,090
23	-0,794	0,996
24	-0,120	-0,107

Taulukko 13. Tähyksistä tehtyjen kuvahavaintojen vaikutus kalibrointikuvan ulkoisen orientoinnin määrittämisen tarkkuuteen.

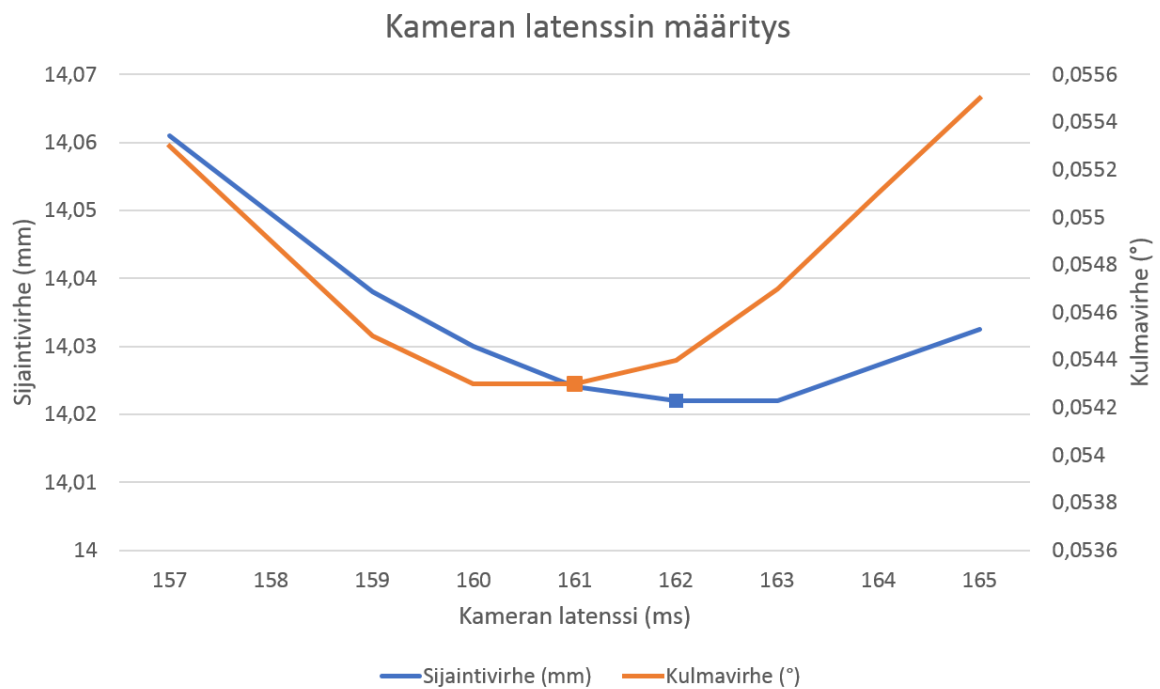
$\sigma_{RMS_{pix}}$	$\sigma_{X_0Y_0}$ (mm)	σ_{Z_0} (mm)	$\sigma_{X_0Y_0Z_0}$ (mm)	σ_{yaw} (°)	σ_{pitch} (°)	σ_{roll} (°)	σ_{ypr} (°)
0,014	0,366	0,220	0,427	$7,817e^{-3}$	$1,862e^{-3}$	$8,836e^{-3}$	0,0119

QINSy-ohjelmiston mukaisella menetelmällä suoritettussa karkeassa aikasynkronoinnissa kameran latenssiksi saatiin 105 ms (maksimi-arvo latenssille). Kameran latenssin määrittämiseksi tehdyssä testissä latenssiarvot vaihtelivat tasaisesti välillä -53-105 ms.

Kameran latenssiarvon hienosäätämiseksi tehdyssä tutkimuksessa kameran latenssiksi määritettiin 161,5 ms (taulukko 14 ja kuva 31).

Taulukko 14. Kuvien georeferoinnin sisäinen tarkkuus (tasoitetun ja alkuperäisen kuva-aineiston väliset erot) erilaisilla kameran latenssin arvoilla.

	157 ms	159 ms	160 ms	161 ms	162 ms	163 ms	165 ms
Sijaintivirhe (mm)	14.061	14.038	14.03	14.024	14.022	14.022	14.0325
Kulmavirhe (°)	0.0553	0.0549	0.0543	0.0543	0.0544	0.0547	0.0555



Kuva 31. Kuvien georeferoinnin sisäinen tarkkuus erilaisilla kameran latenssin arvoilla.

6.2 Kuvien georeferoinnin ja kohteiden kartoituksen tarkkuus

Taulukko 15. Kuvien georeferoinnin keskimääräiset erot referenssiaineistoon nähden.

	$\Delta X_0 Y_0$ (mm)	ΔZ_0 (mm)	$\Delta X_0 Y_0 Z_0$ (mm)	$\Delta \omega$	$\Delta \varphi$	$\Delta \kappa$	$\Delta \omega \varphi \kappa$
Alkuperäinen kuva-aineisto	18.63	0.46	19.66	-0.228	0.110	0.214	0.335
Tasoitettu kuva-aineisto	12.41	0.46	12.60	-0.238	0.105	0.200	0.330

Taulukko 16. Kohteiden fotogrammetrisen kartoituksen tarkkuus yksittäisiltä mittalinjoilta. Ilmoitetut RMS-luvut ovat keskiarvoja Tiiliseinä-testikentän takymetripisteistön (18 tähyistä) kartoituksen tarkkuuksista. Yksittäisten tähyisten kartoituksen tarkkuudet yksittäisiltä mittalinjoilta olivat samankaltaisia: poikkeamat keskiarvosta olivat enimmillään 3-4 mm luokkaa.

Mittalinja	RMS_{XY} (mm)	RMS_Z (mm)	RMS_{XYZ} (mm)
Mittalinja 1 (4 kuvaa)	27,74	5,96	35,89
Mittalinja 2 (4 kuvaa)	24,07	4,79	25,48
Mittalinja 3 (5 kuvaa)	36,50	11,27	40,71
Keskiarvo	29,43	7,34	34,03
Keskihajonta	6,39	3,45	7,79

6.3 Kuvien ja laserpistepilven yhteensovittamisen tarkkuus

Taulukko 17. Kuvapistepilven ja laserpistepilven kohdekoordinaatit tähyksille T1-T4 ja referenssipisteille R1-R6 sekä pisteiden väliset eroavaisuudet sijainneissa ennen aineistojen yhteensovitusta.

	Laserpistepilvi			Kuvapistepilvi			Piste	ΔXY (m)	ΔZ (m)	ΔXYZ (m)
Piste	X	Y	Z	X	Y	Z				
T1	26487549,991	6903172,341	79,357	26487549,966	6903172,308	79,483	T1	0,041	0,126	0,133
T2	26487531,227	6903160,590	79,426	26487531,175	6903160,538	79,569	T2	0,074	0,143	0,161
T3	26487524,438	6903166,791	81,520	26487524,365	6903166,726	81,662	T3	0,098	0,142	0,173
T4	26487538,213	6903175,411	81,447	26487538,165	6903175,371	81,584	T4	0,063	0,137	0,151
R1	26487506,890	6903161,850	81,554	26487506,810	6903161,759	81,701	R1	0,122	0,147	0,191
R2	26487525,647	6903169,152	82,562	26487525,589	6903169,096	82,702	R2	0,081	0,140	0,162
R3	26487561,327	6903190,181	81,761	26487561,301	6903190,112	81,874	R3	0,074	0,113	0,135
R4	26487651,633	6903174,309	82,400	26487651,616	6903174,306	82,477	R4	0,018	0,077	0,079
R5	26487603,096	6903263,693	83,542	26487602,990	6903263,693	83,643	R5	0,106	0,101	0,146
R6	26487698,163	6903107,617	94,655	26487698,198	6903107,591	94,799	R6	0,043	0,144	0,150
							T1-T4	0,069	0,137	0,154
							R1-R6	0,074	0,120	0,144
							Yhteensä	0,072	0,127	0,148


```
[11:56:49] [PointPairRegistration] Scale: fixed (1.0)
[11:56:58] [PointPairRegistration] Final RMS: 0.0211913
[11:56:58] [PointPairRegistration] Applied transformation matrix:
[11:56:58]
0.999999761581    -0.000558390107    0.000436898845    0.010833740234
0.000558305008    0.999999821186    0.000194866137    -0.028259277344
-0.000437007577   -0.000194622175    0.999999880791    0.139549255371
0.000000000000    0.000000000000    0.000000000000    1.000000000000
```

Kuva 32. Muunnosmatriisi laserpistepilven ja kuvien yhteensovituksessa. Muunnosmatriisi noudattaa yhtälössä 34 esitettyä muotoa. Yhdenmuotoisuusmuunnoksen siirtoparametrien ja ilmoitetun tarkkuuden (RMS) yksiköt on ilmoitettu metreinä.

Kuvan 32 muunnosmatriisista nähdään, että laserpistepilveä on siirretty ja kierretty seuraavasti:

- $\Delta X = 1,08 \text{ cm}$
- $\Delta Y = -2,83 \text{ cm}$
- $\Delta Z = 13,95 \text{ cm}$
- $\Delta \omega = 1.9462e^{-4} \text{ }^\circ$
- $\Delta \varphi = -4.3701e^{-4} \text{ }^\circ$
- $\Delta \kappa = -5.5831e^{-4} \text{ }^\circ$

Taulukko 18. Kuvapistepilven ja laserpistepilven kohdekoordinaatit liitospisteille T1-T4 ja tarkistuspisteille R1-R6 sekä pisteiden väliset eroavaisuudet sijainneissa aineistojen yhteensovituksen jälkeen.

	Laserpistepilvi			Kuvapistepilvi			Piste	$\Delta XY \text{ (m)}$	$\Delta Z \text{ (m)}$	$\Delta XYZ \text{ (m)}$
Piste	X	Y	Z	X	Y	Z				
T1	26487549,940	6903172,300	79,485	26487549,966	6903172,308	79,483	T1	0,028	-0,002	0,028
T2	26487531,183	6903160,539	79,564	26487531,175	6903160,538	79,569	T2	0,008	0,005	0,010
T3	26487524,391	6903166,736	81,660	26487524,365	6903166,726	81,662	T3	0,028	0,002	0,028
T4	26487538,175	6903175,375	81,579	26487538,165	6903175,371	81,584	T4	0,011	0,005	0,012
R1	26487506,846	6903161,786	81,703	26487506,810	6903161,759	81,701	R1	0,045	-0,002	0,045
R2	26487525,599	6903169,098	82,701	26487525,589	6903169,096	82,702	R2	0,011	0,001	0,011
R3	26487561,267	6903190,147	81,880	26487561,301	6903190,112	81,874	R3	0,049	-0,006	0,049
R4	26487651,582	6903174,326	82,483	26487651,616	6903174,306	82,477	R4	0,039	-0,006	0,039
R5	26487602,996	6903263,683	83,629	26487602,990	6903263,693	83,643	R5	0,011	0,014	0,018
R6	26487698,155	6903107,662	94,731	26487698,198	6903107,591	94,799	R6	0,083	0,068	0,107
							T1-T4	0,019	0,003	0,019
							R1-R6	0,040	0,012	0,045
							Yhteensä	0,031	0,008	0,035

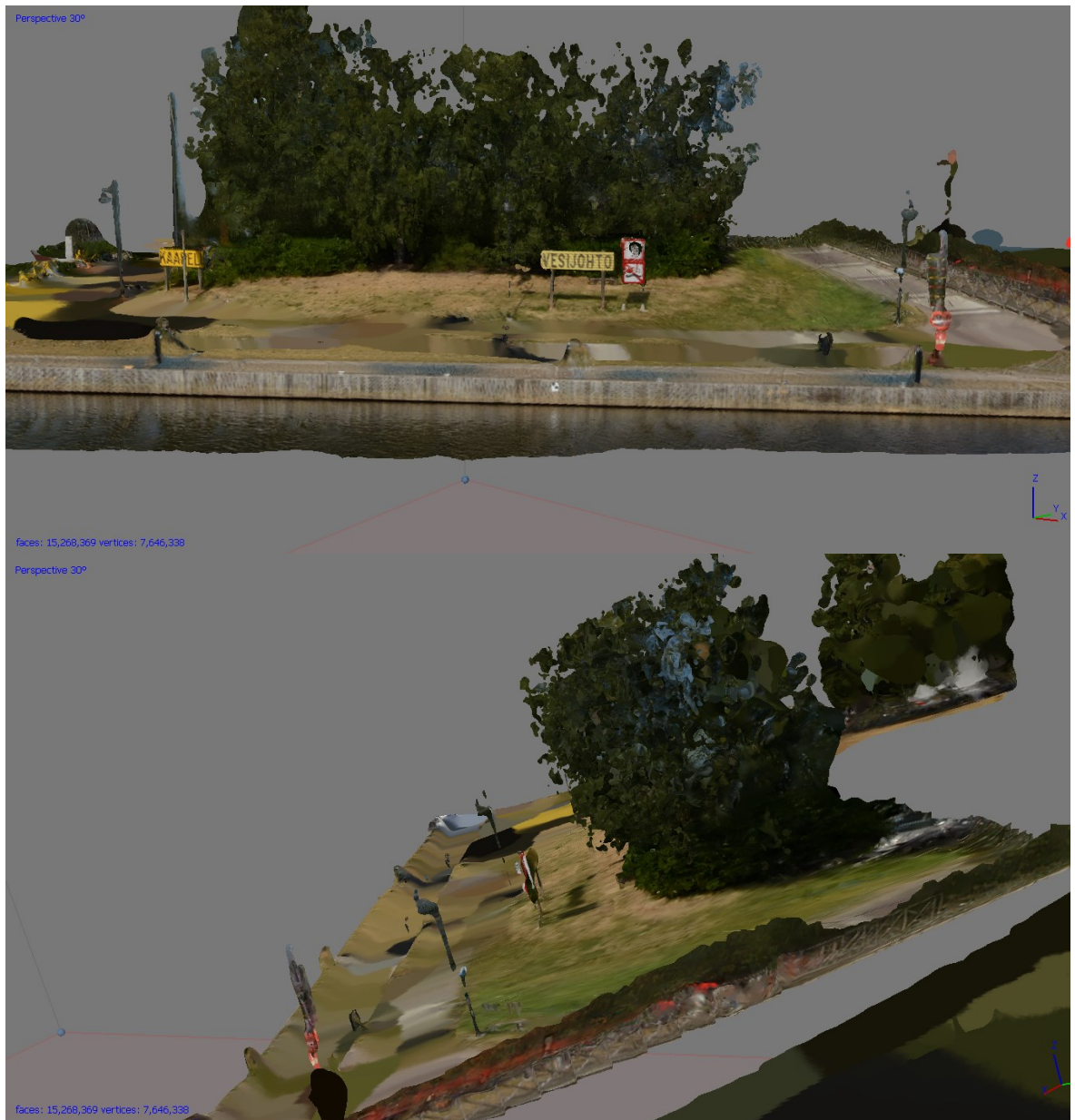
Taulukko 19. Liitospisteistä T1-T4 ja tarkistuspisteistä R1-R6 tehtyjen kuvahavaintojen ja niitä vastaavien kuvatasolle projisoitujen laserpisteiden väliset etäisyydet kuvatasolla aineistojen yhteensovittamisen jälkeen. Yksittäisille pisteille ilmoitetut pikseliarvot ovat yksittäisiltä kuvilta tehtyjen mittausten keskiarvoja.

Piste	Δx (pikseliä)	Δy (pikseliä)	Δxy (pikseliä)
T1	4.09	0.57	4.13
T2	0.78	0.55	0.99
T3	2.86	0.28	2.88
T4	1.12	0.64	1.33
R1	3.70	0.32	3.72
R2	0.45	0.44	0.67
R3	1.71	0.45	1.84
R4	2.27	0.31	2.31
R5	1.12	1.45	1.89
R6	4.94	5.21	7.25
T1-T4	2.21	0.51	2.33
R1-R6	2.36	1.36	2.95
Yhteensä	2.30	1.02	2.70

6.4 Laserpistepilven värjääminen ja 3D-mallin teksturointi



Kuva 33. Näytteitä väritetystä laserpistepilvestä.



Kuva 34. Näytteitä laserpisteiden perusteella luodusta 3D-pintamallista, joka on teksturoitu georeferoitujen kuvien avulla.

7 Pohdinta

Kameran kalibroitiparametrien keskiarvot testatuissa kalibroitimenetelmissä on esitetty taulukossa 6. Taulukkoa tarkastellessa on huomioitava, että iWitness-kalibrointi on suoritettu huomattavasti muiden kalibroitimenetelmien testausta aiemmin ja kameran objektiivin on kertaalleen irrotettu ja kiinnitetty uudelleen ennen muiden kalibroitimenetelmien testausta. Tästä syystä iWitness-kalibroinnissa ratkaistut kalibroitiparametrit eivät ole täysin vertailukelpoiset muihin menetelmiin nähden. Taulukon 1 perusteella iWitness-kalibroinnin ratkaisu kuvan pääpisteelle poikkeaa merkittävästi muiden menetelmien ratkaisusta. Myös Agisoft Photoscan -ohjelmistolla tehdyn itsekalibroinnin ratkaisu kameravakiolle on muihin menetelmiin nähden selkeästi pienempi. ”Agisoft PS”- ja iWitness-menetelmissä saadaan hyvin samankaltainen tulos radiaaliselle piirtovirheelle, jonka ensimmäisen asteen termillä k_1 on näiden menetelmien välillä vain 0,2 % ero. Suurin ero k_1 -parametreissa on OpenCV:n ja iWitness-menetelmän välillä, 3,6 %. Kuvasta 30 nähdään, että iWitness-kalibroinnissa tangentialisen piirtovirheen vaikutus on pieni verrattuna radiaaliseen piirtovirheeseen: vektorien mittakaavoissa 50-kertainen ero. Koska radiaaliset ja tangentialiset piirtovirheet ovat kaikissa testatuissa kalibroitimenetelmissä samaa mittaluokkaa, pysyy tangentialisen piirtovirheen vaikutus pienenä kaikissa kalibroitimenetelmissä.

Eri kalibroitimenetelmien luotettavuutta tutkittiin tarkastelemalla kalibroitiparametrien keskihajontoja ja pikselitarkkuutta (taulukko 7). Luotettavuudella tarkoitetaan tässä yhteydessä sitä, kuinka hyvin eri kalibroitimenetelmillä saadut tulokset ovat toistettavissa. ”Agisoft PS”- ja iWitness-kalibroinnit osoittautuivat vertailun perusteella luotettavimmiksi menetelmiksi. Ne tarjoavat kameravakion, kuvan pääpisteen ja tangentialisen piirtovirheen osalta pienimmät keskihajonnat. ”Agisoft PS”-menetelmä antoi vakaimman tuloksen radiaaliselle piirtovirheelle. iWitness-kalibroinnilla saavutettiin puolestaan selkeästi paras pikselitarkkuus.

Kameran kalibroitiparametrien vaikutusta alustakalibrointiin tutkittiin vertailemalla eri kalibroitimenetelmien tuloksilla laskettuja kalibroitikuvan ulkoisen orientoinnin ratkaisuja ja ratkaisujen keskihajontoja keskenään (taulukot 8-10). Taulukon 9 mukaan ”Agisoft PS”-menetelmällä tarjoaa vakaimman ratkaisun kalibroitikuvan ulkoiselle orientoinnille: projektiokeskuksen sijainnin keskihajonta on 2 mm ja kiertoaseman 0,006 °. Myös iWitness-menetelmällä saavutetaan lähes yhtä vakaa ratkaisu: 3mm ja 0,007°. Taulukoista 8 ja 10 kuitenkin huomataan, että ”Agisoft PS”-menetelmän avulla tuotettu alustakalibroinnin ratkaisu kalibroitikuvan projektiokeskuksen sijainnille poikkeaa huomattavasti muilla menetelmillä tuotetuista ratkaisusta. ”Agisoft PS”-menetelmällä laskettu projektiokeskuksen sijainnin ero iWitness-menetelmän ratkaisuun on 1,9 cm ja shakkilautakalibrointeihin verrattuna saadaan vielä suuremmat eroavaisuudet: 2,4 ja 2,5 cm. Kalibroitikuvan kiertokulmien pitch-arvot pysyvät samankaltaisina kaikkien kameran kalibroitimenetelmien kesken: suurin ero pitch-arvoissa on 0,0075°. Yaw- ja roll-arvojen osalta vaihtelevuus menetelmien välillä on suurempaa, yaw-arvolla maksimissaan 0,0359° ja roll-arvolla maksimissaan 0,0374°.

Kalibroitikuvan orientoinnin fotogrammetrisen määrittämisen tarkkuutta tutkittiin kuvahavaintojen residuaaleja ja erilaisia kuvahavaintoyhdistelmiä vertailemalla (taulukot 11-13). Taulukosta 12 huomataan, ettei yksittäisten tähysten 3D-koordinaateissa tai kuvahavainnoissa ole merkittäviä orientointiratkaisuun vaikuttavia karkeita virheitä. Tähyksistä tehtyjen kuvahavaintojen vaikutus kalibroitikuvan projektiokeskuksen sijaintiin on taulukon 13 mukaan vain 0,4 mm, mutta vaikutus kiertoasemaan on hieman merkittävämpi 0,012°.

Kameran latenssin arvo pyrittiin määrittämään karkeasti QINSy-ohjelmiston mukaisella menetelmällä, jossa verrattiin kameran laukausignaalin aikaa kuvaan tietokoneen näytöllä juoksevasta GPS-ajasta. Myöhemmin kameran latenssin arvo määritettiin tarkemmin Tiiliseinä-testikentän aineistosta minimoimalla kuvien ulkoisten orientointien sisäiset virheet tasoitettussa kuva-aineistossa (taulukko 14, kuva 31). Karkeassa aikasyntronoinnissa kameran latenssin arvo jäi jopa 56,5 millisekuntia pienemmäksi kuin Tiiliseinä-testikentän aineiston perusteella määritetty arvo. Aikasyntronoinnin tarkkuus jäi kysymysmerkiksi, mutta Tiiliseinä-testikentän tasoitettussa kuva-aineistossa optimaaliset latenssin arvot projektiokeskusten sijainneille ja kuvien kiertoasemille olivat vain yhden millisekunnin päässä toisistaan. Lisäksi taulukosta 14 huomataan, että aikasyntronoinnin tarkkuus ei vaikuta merkittävästi kuvien yhteensovituksen sisäiseen tarkkuuteen, kun alustan liikkumisnopeus on pieni. Aikasyntronoinnin vaikutus sijaintitarkkuuteen riippuu alustan nopeudesta luvussa 3.3 esitetyn taulukon 1 mukaisesti.

Tiiliseinä-testikentän aineistoa käytettiin myös kuvien georeferoinnin tarkkuuden määrittämiseen. Taulukossa 15 verrataan alkuperäistä (suoraan GNSS/INS-havaintojen ja järjestelmäkaliibroinnissa määritetyillä parametreilla lasketut kuvien ulkoiset orientoinnit) ja tasoitettua (kuvien yhteensovituksen avulla parannetut kuvien ulkoiset orientoinnit) kuva-aineistoa signaloitujen tähytusten avulla määritettyihin kuvien ulkoisiin orientointeihin (referenssiaineisto). Referenssiaineiston ulkoisten orientointien määrittäminen perustui käänteisellä georeferoinnilla ja ”Agisoft PS”-menetelmällä hankittuihin kameran kalibroitamparametreihin, joten tulokset eivät kerro kuvien ulkoisten orientointien absoluuttista tarkkuutta. Alkuperäisen kuva-aineiston ja referenssiaineiston välinen keskimääräinen ero projektiokeskusten sijainneissa oli 19,7 mm ja kiertoasemissa $0,34^\circ$. Projektiokeskusten sijainneissa ero koostui pääosin vaakasuuntaisesta erosta, joka oli keskimäärin 18,6 mm. Korkeusero oli keskimäärin vain 0,5 mm. Kuvien yhteensovituksessa projektiokeskusten sijaintien keskimääräinen ero referenssiaineistoon nähden pieneni huomattavasti lukemaan 12,6 mm (vaakasuunnassa 12,4 mm, korkeusuunnassa 0,5 mm). Kiertoasemissa keskimääräinen ero ($0,33^\circ$) pysyi samankaltaisena alkuperäiseen kuva-aineistoon nähden.

Käytetyn mobiilikartoitusjärjestelmän kartoituksen absoluuttista sijaintitarkkuutta arvioitiin vertaamalla yksittäisiltä mittalinjoilta otetuista kuvista mitattujen signaloitujen tähytusten (yhteensä 18 kpl) estimoituja 3D-koordinaatteja geodeettisesti mitattuihin 3D-koordinaatteihin (taulukko 16). Absoluuttiseen sijaintitarkkuuteen vaikuttavat eniten GNSS/INS-havaintojen tarkkuus sekä järjestelmäkaliibroinnin laatu. Kohteiden kartoittamisen tarkkuus oli keskimäärin 3,4 cm. Vaakasuuntaisen virheen osuus oli 2,9 cm ja pystysuuntaisen vain 0,7 cm. Kartoitettujen tähytusten 3D-koordinaattien keskihajonta eri mittalinjojen välillä oli 0,8 cm.

POSPac-ohjelmiston raportti jälkilasketulle GNSS/INS-aineistolle on esitetty liitteessä 1. Mittaussektion aikana on tapahtunut muutama GNSS-katkos, jotka ajoittuvat siltojen alitukseen (liite 1, sivu 36). GNSS-katkot ovat lyhyitä ja ne ovat laserkeilaus- ja kuva-aineiston hankkimisajankohtien ulkopuolella. GNSS-vastaanottimilla oli mittaussektion aikana yhteys keskimäärin 14 satelliittiin (8 GPS- ja 6 GLONASS-satelliittia) ja keskimääräinen PDOP-lukema oli 1,52 (liite 1, sivu 17).

Ennen kuvien ja laserkeilausaineiston yhteensovitusta aineistojen väliset vastinpisteiden 3D-koordinaatit tähyksille T1-T4 ja referenssipisteille R1-R6 poikkesivat toisistaan keskimäärin

14,8 cm (taulukko 17). Vastinpisteiden 3D-koordinaattien välisten etäisyyksien erot vaihtelivat välillä 7,9-19,1 cm.

Agisoft Photoscan -ohjelmistolla toteutetun kuvien yhteensovituksen raportti löytyy liitteestä 2. Tässä raportissa esitetyt arvot kuvaavat kuvien ulkoisten orientointien sisäisiä virheitä, jotka koostuvat alkuperäisten ja kuvien yhteensovituksen jälkeisten estimoitujen orientointiparametrien välisistä eroavaisuuksista. Agisoft Photoscan ilmoittaa kuvien välille määritettyjen liitospisteiden pikselivirheeksi 0,54 pikseliä. Kuvien projektiokeskusten sijaintien keskivirhe oli 3,1 cm ja kiertoasemien $0,15^\circ$ ω -, ϕ -, κ -kulmina. Sijaintivirheet olivat suurimmillaan eteläisimmällä mittalinjalla sekä mallinnettavan alueen pohjoisimmissa osissa korkeiden kerrostalojen läheisyydessä (liite 2, sivu 4). Suurimmat kulmavirheet löytyvät puolestaan mittalinjojen mutkakohdista (liite 2, sivu 5).

Tähysten T1-T4 avulla tehdyssä aineistojen välisessä yhteensovituksessa päästiin tähysten 3D-koordinaattien osalta RMS-arvon perusteella 2,1 cm tarkkuuteen (kuva 32). Yhteensovituksessa merkittävin muutos tehtiin korkeussuunnassa: laserpisteitä siirrettiin 14 cm ylöspäin. Tasokoordinaattien osalta laserpisteille tehtiin 3,0 cm suuruinen siirto. Laserpistepilveä kierrettiin ω -, ϕ -, κ -kiertokulmina yhteensä $0,044^\circ$ verran.

Yhteensovituksen jälkeen kuvilta ja laserkeilausaineistosta määritetyt 3D-vastinpisteet poikkesivat toisistaan keskimäärin 1,9 cm toisistaan (taulukko 18). Tämä ero koostui pääosin vaakasuuntaisesta erosta, tähyksille mitatut korkeuskoordinaatit poikkesivat keskimäärin vain 0,3 cm toisistaan. Referenssipisteiden osalta aineistojen yhteensovittamisen tarkkuus oli keskimäärin 4,5 cm, joka koostuu 4,0 cm suuruudesta vaakasuuntaisesta erosta ja 1,2 cm korkeuserosta. Referenssipisteelle R6 mitatut vastinpisteet erosivat eniten toisistaan, 10,7 cm. Jos referenssipiste R6 jätetään tarkastelun ulkopuolelle, referenssipisteille R1-R5 mitatuille 3D-vastinpisteiden keskimääräiseksi tarkkuudeksi saadaan 3,2 cm.

Kuvien ja laserpistepilven yhteensovituksen tarkkuutta kuvatasolla tutkittiin vertaamalla vastinpisteistä tehtyjen kuvahavaintojen ja niitä vastaavien kuvatasolle projisoitujen laserpisteiden kuvakoordinaatteja keskenään (taulukko 19). Yhteensovitukseen käytettyjen tähysten pikselivirheeksi saatiin 2,3 pikseliä ja referenssipisteiden osalta 3,0 pikseliä. Ilman referenssipistettä R6 referenssipisteiden pikselitarkkuus on 2,1 pikseliä. Vaakasuuntaiset pikselivirheet olivat suurempia kuin korkeussuuntaiset. Tähysten kuvakoordinaattien pikselivirheet olivat vaakasuunnassa 2,2 pikseliä ja korkeussuunnassa 0,5 pikseliä, referenssipisteiden osalta puolestaan 2,4 ja 1,4 pikseliä.

Kuvien ja laserkeilausaineiston yhteensovittaminen on onnistunut tarkasti (kuva 33). Väritetystä laserpistepilvestä, jonka pistetiheys on 1 cm luokkaa, on vaikea löytää aineistojen yhteensovituksesta johtuvia väriarvojen virheellisiä määrityksiä. Joitakin kuvien ja laserpisteiden välisistä kohteista taustalla oleville laserpisteille heijastuneita väriarvoja ei ole onnistuttu korjaamaan manuaalisesti. Lisäksi esimerkiksi Kuokkalan sillan katulamppujen yläosille ei voitu määrittää väriarvoja, koska ne rajoittuivat kuva-alueen ulkopuolelle. Kuvasta 34 nähdään, että pystysuuntaisten, tasomaisten kohteiden mallintaminen on onnistunut hyvin kuva-aineiston avulla teksturoidussa 3D-mallissa. Muiden kohteiden kuvaaminen 3D-mallissa, joka muodostettiin yhdestä suunnasta laserkeilatun pistepilven avulla, osoittautui kuitenkin hankalaksi tehtäväksi Agisoft Photoscan -ohjelmistolle. Teksturoinnin tarkkuus on hyvä kuvissa näkyville kohteille.

8 Johtopäätökset

Tämän työn tavoitteena oli hyödyntää fotogrammetrisia menetelmiä liikkuvalla alustalla tuotetun laserkeilausaineiston visualisoinnissa. Työn kokeellisessa osuudessa 16 mm kiinteän polttovälin objektiivilla varustettu Nikon D7100 järjestelmäkamera liitettiin osaksi mobiilikartoitusjärjestelmää, jonka komponentteina ovat kameran lisäksi GNSS-vastaanottimien ja inertiajärjestelmän muodostama paikannusjärjestelmä, laserkeilain sekä monikeilainkalkulaattori. Kuva-aineiston suoran georeferoinnin mahdollistamiseksi suoritettiin järjestelmäkallibrointi, johon sisältyi kameran kalibrointiparametrien eli sisäisen orientoinnin ja linssivirheiden ratkaiseminen, kameran ja alustan keskinäinen orientointi sekä aikasyntronointi kameran ja paikannusjärjestelmän välillä. Koska kameraa ja laserkeilainta ei synkronoitu suoraan keskenään, näiden kartoitussensorien tuottamat itsenäiset aineistot oli rekisteröitävä samaan koordinaatistoon ennen laserpistepilven väritystä tai laserpisteistä muodostuvan 3D-pintamallin teksturointia. Aineistojen väliseen yhteensovitusprosessiin kuuluivat kuvien yhteensovitus SfM-tekniikkaan perustuen käyttäen Agisoft Photoscan -ohjelmistoa sekä vastin pisteiden avulla tehty yhdenmuotoisuusmuunnos, jossa laserpistepilven koordinaatit sovitettiin kuva-aineiston suhteen.

Kameran kalibroinnissa vertailtiin keskenään neljää eri kalibrointimenetelmää: Matlab- ja OpenCV-shakkilautakalibrointeja, Agisoft Photoscan -ohjelmistolla toteutettua itsekallibrointia sekä iWitness-kallibrointia. Kallibrointimenetelmien vertailun perusteella iWitness-kallibrointi antoi parhaan pikselitarkkuuden ja vaikutti luotettavimmalta menetelmältä kameran sisäisen orientoinnin ja linssivirheiden parametrien määrittämiseksi. Mittaveneellä tehty mittaussessiot päätettiin kuitenkin suorittaa Agisoft Photoscan -ohjelmistolla toteutetun itsekallibroinnin avulla, koska kameran kalibrointiparametrit olivat muuttuneet noin 3 kuukautta vanhasta iWitness-kallibroinnista, jonka jälkeen kameran objektiivi irrotettiin kertaalleen. ”Agisoft PS”-menetelmä osoittautui kalibrointiparametrien määrittämisen toistettavuuden kannalta luotettavimmaksi metodiksi, mutta sen ratkaisu kameravakiolle poikkesi merkittävästi muiden kalibrointimenetelmien ratkaisusta. Pieni kameravakion arvo on saattanut vaikuttaa merkittävästi kuvien georeferoinnin ja kohteiden fotogrammetrisen kartoittamisen tarkkuuteen muihin kalibrointimenetelmiin nähden.

Kameran ja alustan keskinäinen orientointi (alustakallibrointi) ratkaistiin kaksivaiheisessa prosessissa, jossa testikentästä otetun kalibrointikuvan ulkoista orientointia verrattiin suoraan kuvanottohetken GNSS/INS-havaintojen perusteella määritettyyn alustan ulkoiseen orientointiin. Alustakallibroinnissa testattiin, kuinka erilaiset kameran kalibrointiparametrit ja variaatiot tähyksistä tehtävissä kuvahavainnoissa vaikuttivat kalibrointikuvan ulkoisen orientoinnin määrittämiseen. Kameran kalibrointimenetelmissä määritettyjen ratkaisujen keskihajontojen perusteella lasketut variaatiot kalibrointikuvan projektiokeskuksen sijainnille ja kiertoasemalle pysyivät maltillisina, mutta kameran kalibrointimenetelmän valinnalla huomattiin olevan suuri vaikutus kuvien ulkoisiin orientointeihin. ”Agisoft PS”-menetelmän kalibrointiparametrien avulla määritetty kalibrointikuvan projektiokeskuksen sijainnin ratkaisu poikkesi 1,9-2,5 cm muiden menetelmien ratkaisuihin nähden. Tämä poikkeama tapahtui pääosin vaakasuuntaisesti. Kalibrointikuvan kiertoaseman määrittämisessä havaittiin kaikkien kalibrointimenetelmien kesken merkittäviä 0,01-0,05° vaihteluita. Tähyksistä tehtävät kuvahavainnot vaikuttivat tulosten perusteella kalibrointikuvan kiertoaseman määrittämiseen noin 0,01° verran (”Agisoft PS”-menetelmän kalibrointiparametreilla), mutta vaikutukset projektiokeskuksen sijaintiin olivat mitättömiä. Paikannusjärjestelmän laadulla on

myös suuri vaikutus järjestelmäkalibroinnin onnistumisessa. Valmistajan ilmoittamien arvojen perusteella GNSS/INS-havaintojen tarkkuus on projektiokeskuksen sijainnille noin 8 mm vaakasuunnassa ja 15 mm korkeussuunnassa sekä $0,015^\circ$ kiertoaseman osalta, kun käytetään jälkilaskettuja GNSS/INS-havaintoja. Lisäksi täytyy huomioida, että myös geodeettisten mittausten tarkkuus testikentän tähytsten 3D-kohdekoordinaattien määrittämisessä vaikuttaa olennaisesti järjestelmäkalibroinnin lopputulokseen.

Kameran ja paikannusjärjestelmän välisen aikasyntronoinnin toteuttamiseksi testattiin kahta hyvin erilaista menetelmää kameran latenssin määrittämiseksi. Karkeassa menetelmässä kameran laukaisusignaalin aikaa verrattiin kuvaan tietokoneen näytöllä juoksevasta GPS-ajasta. Myöhemmin kameran latenssin arvoa hienosäädettiin minimoimalla Agisoft Photoscan -ohjelmiston ilmoittama kuvien georeferoinnin sisäinen virhe kuvien yhteensovituksessa sekä projektiokeskuksen sijainnin että kuvien kiertoaseman osalta. Karkeassa menetelmässä määritetty kameran latenssin arvo osoittautui liian pieneksi. Menetelmien välinen ero saattaa johtua systemaattisesta virheestä karkeassa aikasyntronoinnissa, kuten tietokoneen näytöllä mahdollisesti viiveellä juoksevasta GPS-ajasta. Jos virhe on systemaattinen, karkeaa aikasyntronointimenetelmää voidaan soveltaa jatkossa toteutettavissa aikasyntronoinneissa lisäämällä kameran latenssin arvoon tässä työssä havaittu ero menetelmien välillä (mikäli karkea aikasyntronointi toteutetaan samantyyppisellä tietokoneella). Tämän idean hyödyntäminen vaatii kuitenkin jatkotutkimusta.

Kuvien georeferoinnin ja fotogrammetrisen kartoituksen tarkkuutta tutkittiin Tiiliseinä-testikentän geodeettisesti mitattujen tähytsten ja niistä tehtyjen kuvahavaintojen avulla. Kuvien georeferointi poikkesi tähytsten avulla georeferoidusta referenssiaineistosta projektiokeskuksen sijainneissa 2,0 cm ja kiertoasemissa $0,34^\circ$. Kuvien yhdistämisen jälkeen poikkeamat pienenivät arvoihin 1,3 cm ja $0,33^\circ$. Kuvien kiertoasemien osalta poikkeama on suuri verrattuna järjestelmäkalibroinnin osaprosesseille ja GNSS/INS-havainnoille määritettyihin tarkkuuksiin. Virhettä saattaa syntyä kameran uudelleenkiinnityksessä, jossa etenkin kameran kiertoasema voi muuttua hieman. Uudelleenkiinnityksessä tapahtuvan virheen minimoimiseksi voidaan kameralle hankkia vakaampi kiinnitysalusta. Tähytsten fotogrammetrisesti määritetyt 3D-kohdekoordinaatit poikkesivat geodeettisesti mitatuista arvoista keskimäärin 3,4 cm, kun käytettiin yksittäisten mittalinjojen ratkaisuja. Kohteiden fotogrammetrisen kartoituksen absoluuttinen tarkkuus oli hyvä ja samassa mittaluokassa aikaisempien tutkimusten kanssa, vaikka käytössä oli vain yhden kameran järjestelmä. Toisaalta mallinnettava kohde oli optimaalinen fotogrammetriseen kartoitukseen: tiiliseinä tarjoaa hyvän tekstuurin avainpisteiden määrittämistä varten, mittalinjat olivat lähes suoria ja kartoitettavien tähytsten etäisyydet kamerasta olivat vain kymmenen metrin luokkaa. Vesistöillä tapahtuvissa mitaussessioissa kuvausympäristöt ovat tyypillisesti kuvien yhteensovittamisen kannalta vaativampia.

Kuva- ja laserkeilausaineiston yhdistämistä tutkittiin Jyväskylässä Kuokkalan sillan lähiympäristössä toteutetussa maastotestissä. Alueen luonnollisten kohteiden avulla määritettyjen referenssipisteiden perusteella kuva- ja laserkeilausaineistot poikkesivat toisistaan merkittävästi etenkin korkeussuunnassa (noin 14 cm). Koska liitteen 2 mukaan kuvien ulkoiset orientoinnit onnistuivat melko tarkasti (sijaintivirhe keskimäärin 3,1 cm, kulmavirhe $0,15^\circ$ ω -, ϕ -, κ -kiertokulmina), voi laserkeilaimen kalibrointi sisältää epätarkkuuksia. Kuva- ja laserkeilausaineistojen yhteensovituksen jälkeen saavutettiin 4,5 cm sijaintitarkkuus kohdekoordinaatistossa ja 3,0 pikselin tarkkuus kuvatasolla. Yhteensovittamisen luotettavuutta voidaan parantaa lisäämällä liitospisteitä yhteensovitukseen.

Laserpistepilven visualisointi kuva-aineiston perusteella määritetyillä RGB-väriarvoilla onnistui tarkasti. Kameran huomattiin olevan asennettu liian alaviistoon, jolloin jotkin kohteet rajoittuivat kuvan ulkopuolelle. Laserpisteiden avulla luotujen 3D-pintamallien muodostamista vaikeutti huono kuvaus- ja skannausgeometria. Monien kohteiden, kuten kaiteiden ja pylväiden, kolmiulotteinen mallintaminen ei onnistu tarkasti yhdestä suunnasta hankituilla kuva- ja laserkeilausaineistoilla. Georeferoitujen kuvien avulla luoduista 3D-pintamalleista voidaan kuitenkin poimia esimerkiksi seinämiä ja muita tasomaisia, pystysuuntaisia kohteita hyvällä tarkkuudella.

Tärkeimmäksi jatkokehityskohteeksi jäi kameran kiinnitystelineen uusiminen sellaiseksi, että kuvaus ja laserkeilaus voidaan suorittaa samanaikaisesti. Lisäksi kameran pitch-kulma tulee asettaa lähemmäksi vaakatasoa, jolloin korkeat kohteet mahtuvat paremmin kuva-alueelle. Jatkokehityskohteeksi jäi myös laserpisteiden värjäämisen automatisointi. Tässä työssä estemäisten kohteiden väriarvot määrittyivät myös esteiden takana oleville laserpisteille. Tämä voidaan välttää käyttämällä kuvan yksittäinen pikseli vain kuvan projektiokeskusta lähimmälle laserpisteelle. Kuvan kokoa voidaan joutua pienentämään, tarvittaessa etäisyyden funktiona. Lisäksi yksittäisiltä kuvilta väritettyjen laserpisteiden yhdistämiseksi tarvitaan funktio optimaalisen väriarvon määrittystä varten. Se voisi perustua esimerkiksi kuvan projektiokeskuksen ja laserpisteen välisen etäisyyden minimointiin.

Lähdeluettelo

- Alho, P., Kukko, A., Hyyppä, H., Kaartinen, H., Hyyppä, J., Jaakkola, A., 2009. Application of boat-based laser scanning for river survey, *Earth Surface Processes and Landforms* 34, pp.1831–1838.
- Angelats, E. & Colomina, I., 2014. One step mobile mapping laser and camera Data orientation and calibration. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 40(3), pp. 15–20.
- Applanix, 2017. Applanix POS MV Wavemaster II Datasheet. Viitattu 18.10.2018.
Saatavissa: <http://www.applanix.com/downloads/products/specs/posmv/POS-MV-Wave-Master-II.pdf>
- Arya, S., Mount, D., Netanyahu N, Silverman, R. & Wu, A., 1998. An optimal algorithm for approximate nearest neighbor searching in fixed dimensions. *Journal of the Association for Computing Machinery*, Vol. 45(6), pp. 891–923.
- Ballard, D.H. & Brown, C.M., 1982. *Computer Vision*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Barber, D., Dallas, R.W.A., Mills, J.P., 2006. Laser scanning for architectural conservation. *Journal of Architectural Conservation*, Vol. 12 (I), pp. 35-52.
- Barber, D., Mills, J. & Smith-Voysey, S., 2008. Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, Vol. 63(1), pp. 128–141.
- Bauwens, S., Bartholomeus, H., Calders, K. & Lejeune, P., 2016. Forest inventory with terrestrial LiDAR: A comparison of static and hand-held mobile laser scanning. *Forests* 2016, Vol. 7 (127).
- Besl, P. & McKay, N., 1992. A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, Vol. 14 (2), pp. 239–256.
- Blaser, S., Nebiker, S. & Cavegn, S., 2017. System design, calibration and performance analysis of a novel 360° stereopanoramic mobile mapping system. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*. s, IV-1/W, pp. 207–213.
- Brown, D.C., 1971. Close-range camera calibration. *Photogramm. Eng.*, Vol. 37(8), pp. 855–866.
- Burdziakowski, P., Janowski, A., Przyborski, M., Kholodkov, A., Matysik, K., Matysik, M., Szulwic, J., Tysiąc, P. & Wojtowicz A., 2015. Maritime Laser Scanning as the Source for Spatial Data. *Polish Maritime Research*, Vol. 22(4), pp. 9–14.
- Burkhard, J., Cavegn, S., Barmettler, A. & Nebiker, S., 2012. Stereovision Mobile Mapping: System Design and Performance Evaluation. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, Melbourne, Australia, Vol. XXXIX, Part B5, pp. 453–458.

- Cavegn, S., Nebiker, S. & Haala, N., 2016. A Systematic Comparison of Direct and Image-Based Georeferencing in Challenging Urban Areas. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.*, Prague, Czech Republic, Vol. XLI, Part B1, pp. 529–536.
- Chen, T., Yamamoto, K., Chhatkuli, S. & Shimamura, H., 2012. Panoramic Epipolar Image Generation for Mobile Mapping System. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, Melbourne, Australia, Vol. XXXIX, Part B5, pp. 459–464.
- Deshpande, S., 2013. Improved floodplain delineation method using high density LiDAR data, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 28(1), pp. 68–79.
- Ding, L. & Sharma, G., 2017. Fusing structure from motion and lidar for dense accurate depth map estimation. In *Proc. Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing*, pp. 1283–1287.
- El-Sheimy, N., & Hassan, T., 2007. *Mobile Mapping Systems -The New Trend in Mapping and GIS Applications*. Alberta Land Surveyors.
- Eisenbeiss, H., 2004. A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition, in *International Workshop on Processing and Visualization using High-Resolution Images*, Pitsanulok, Thailand (eds. A. Grün, H. Murai, T. Fuse and F. Remondino), *ISPRS Archives*, Vol. XXXVI-5/W1.
- Eugster, H., Huber, F., Nebiker S. & Gisi, A., 2012. Integrated Georeferencing of Stereo Image Sequences Captured with a Stereovision Mobile Mapping System – Approaches and Practical Results from a Practical Perspective. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Melbourne, Australia, Vol. XXXIX, Part B1, pp. 309–314.
- Findley, D., Cunningham, C. & Hummer, J., 2011. Comparison of mobile and manual data collection for roadway components. *Transp. Res. C Emerg. Technol.* 2011, 19, 521–540.
- Fischler, M. & Bolles, R., 1981. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the Association for Computing Machinery*, Vol. 24(6), pp. 381–395.
- Fraser, C., 2013. Automatic camera calibration in close-range photogrammetry. *Photogramm. Eng. Rem. Sens.* Vol. 79(4), pp. 381–388.
- Geiger, A., Moosmann, F., Car, Ö & Schuster, B., 2012. Automatic camera and range sensor calibration using a single shot. *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, St. Paul, MN, USA, 14–18 May 2012, pp. 3936–3943.
- Glennie, C., 2007. Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems. *Journal of Applied Geodesy*, Vol. 1 (3), pp. 147–157.
- Guo, C., Meguro, J. I., Kojima, Y. & Naito, T., 2014. Automatic lane-level map generation for advanced driver assistance systems using low-cost sensors, in *Proceedings of the IEEE*

International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Hong Kong, China, pp. 3975–82.

Haala, N., Peter, M., Kremer, J. & Hunter, G., 2008. Mobile LiDAR Mapping for 3D Point Cloud Collection in Urban Areas -A Performance Test. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Beijing, China, Vol. XXXVII, Part B5. pp.1119–1124.

Habib, A., Datchev, I. & Kwak, E., 2014. Stability Analysis for a Multi-Camera Photogrammetric System. *Sensors*, Vol. 14(8), pp. 15084–15112.

Heikkilä, J. & Silven, O., 1997. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. *Computer Vision and Pattern Recognition 1997*.

Horn, B., 1987. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *J. Opt. Soc. Amer. A* Vol. 4(4), pp. 629-642.

Hunter, G., Cox, C., & Kremer, J., 2006. Development of a commercial laser scanning mobile mapping system – StreetMapper. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, Vol. 36.

Ikeuchi, K., Oishi, T., Takamatsu, J., Sagawa, R., Nakazawa, A., Kurazume, R., Nishino, K., Kamakura, M. & Okamoto, Y., 2007. The Great Buddha project: digitally archiving, restoring, and analyzing cultural heritage objects. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 75(1), pp. 189–208.

Jacobsen, K., 2004. Direct/integrated sensor orientation - pros and cons. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* Vol. 35, pp. 829-835.

Kaartinen, H., Hyypä, J., Kukko, A., Jaakkola, A. & Hyypä, H., 2012. Benchmarking the performance of mobile laser scanning systems using a permanent test field. *Sensors*, Vol. 12(9), pp. 12814-12835.

Kalman, R., 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of basic Engineering*. Vol. 82(1), pp. 35–45.

Kawashima, K., Kanai, S. & Date, H., 2012. Automatic recognition of piping system from laser-scale terrestrial laser scanner point cloud. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 78(8), pp. 722–729.

Kraus, K., 2007. *Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans*, 2nd edition, De Gruyter, Berlin, Germany, 459 pp.

Kremer J. & Hunter G., 2007. Performance of the StreetMapper mobile LiDAR mapping system in real world projects. *Photogrammetric week 2007*, Stuttgart, Germany, pp. 215-225.

Krombach, N., Droschel, D. & Behnke, S., 2015. Evaluation of Stereo Algorithms for Obstacle Detection with Fisheye Lenses. *Int. Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Toronto, Canada, Vol. II-1/W1, pp. 33–40.

Kukko, A., Kaartinen, H., Hyypä, J. & Chen, Y., 2012. Multiplatform mobile laser scanning: Usability and performance. *Sensors*, Vol. 12(9), pp. 11712–11733.

Leica ScanStation P40 User Manual, 2015. Viitattu 18.10.2018. Saatavissa: <http://surveyequipment.com/assets/index/download/id/457/>

Li, X., Zhang, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J. & Schuh, H. 2015. Precise positioning with current multi-constellation global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. *Scientific Reports*, Vol. 5, p. 8328.

Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guan, F., et al., 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 115, pp. 63–77.

Liu, L., Stamos, I., Yu, G., Wolberg, G. & Zokai, S., 2006. Multiview geometry for texture mapping 2D images onto 3d range data. *IEEE Intl. Conf. Comp. Vision and Pattern Recog.*, Vol. 2, pp. 2293–2300.

Lowe, D. 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60(2), 91–110.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. & Boehm, J., 2014. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. de Gruyter, p. 684.

Luhmann, T., Fraser, C., Maas, H., 2016. Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry. *ISPRS J Photogramm. Remote Sens*, Vol. 115, pp. 37–46.

Madeira, S., Gonçalves, J., Bastos, L., 2012. Sensor Integration in a Low Cost Land Mobile Mapping System. *Sensors*, Vol. 12, pp. 2935–2953.

Michoud C., Carrea D., Costa S., Derron M., Jaboyedoff M., Delacourt C., Maquaire O., Letortu P. & Davidson R., 2014. Landslide detection and monitoring capability of boat-based mobile laser scanning along Dieppe coastal cliffs, Normandy. *Landslides*, Vol. 12(2), pp. 403–418.

Mills, J. & Barber, D., 2004. Geomatics techniques for structural surveying. *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 130(2), pp. 56–64.

Nebiker, S., Cavegn, S., Eugster, H., Laemmer, K., Markram, J. & Wagner, R., 2012. Fusion of Airborne and Terrestrial Image-based 3D Modelling for Road Infrastructure Management - Vision and First Experiments. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Melbourne, Australia, Vol. XXXIX, Part B4, pp. 79–84.

Nikon, 2013. Nikon Digital SLR Camera D7100 Specifications. Viitattu 18.10.2018. Saatavissa: http://chsvimg.nikon.com/lineup/dslr/d7100/pdf/d7100_8p.pdf

Novak, K., 1991. The Ohio State University Highway Mapping System: The Stereo Vision System Component. In: Proc. of the 47th Annual Meeting of The Institute of Navigation, Williamsburg, VA, pp. 121–124.

OpenCV 2.4.13.7 -documentation, 2018. Camera Calibration and 3D Reconstruction. Viitattu 12.10.2018. Saatavissa http://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html

Osgood, T. & Huang, Y., 2013. Calibration of Laser Scanner and Camera Fusion System for Intelligent Vehicles Using Nelder-Mead Optimization. *Measurement Science & Technology*, Vol. 24(3).

Paparoditis, N., Papelard, J.-P., Cannelle, B., Devaux, A., Soheilian, B., David, N. & Houzay, E., 2012. Stereopolis II: A Multi-Purpose and Multi-Sensor 3D Mobile Mapping System for Street Visualisation and 3D Metrology. *Rev. française photogrammétrie télédétection*, Vol. 200, pp. 69–79.

Park, Y., Yun, S., Won, C.S., Cho, K., Um, K., Sim, S., 2014. Calibration between color camera and 3D LIDAR instruments with a polygonal planar board. *Sensors*, Vol. 14, pp. 5333–5353.

Pintus, R., Gobbetti, E., and Combet, R., 2011. Fast and robust semiautomatic registration of photographs to 3D geometry. *Intl. Symp. Virtual Reality, Archaeology, and Cultural Heritage*, pp. 9–16.

Pu, S., Rutzinger, M., Vosselman, G., Elberink, S.O., 2011. Recognizing Basic Structures from Mobile Laser Scanning Data for Road Inventory Studies. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens*, Vol. 66, pp. 28–39.

Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J. & Arias, P., 2013. Review of mobile mapping and surveying technologies. *Measurement*, Vol. 46(7), pp. 2127–2145.

QINSy, 2018. How-to QINSY sign conventions. Viitattu 18.10.2018. Saatavissa <http://confluence.qps.nl/qinsy/en/how-to-qinsy-sign-conventions-35587313.html>

Rau, J., Habib, A., Kersting, A., Chiang, K., Bang, K., Tseng, Y. & Li, Y., 2011. Direct Sensor Orientation of a Land-Based Mobile Mapping System. *Sensors*, Vol. 11, pp. 7243–7261.

Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M. & Sarazzi, D., 2011. UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling – current status and future perspectives, *Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g) 2011*, Zurich, Switzerland, September 2011.

Remondino, F. & Fraser, C.S., 2006. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. *Int. Arch. Photogramm. Rem. Sens.* Vol. 36(5), pp. 266–272.

- Rippin, D.M., Pomfret, A. & King, N., 2015. High resolution mapping of supraglacial drainage pathways reveals link between micro-channel drainage density, surface roughness and surface reflectance. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 40, pp. 1279–1290.
- Ryan, J., Hubbard, A., Box J., et al. 2015. UAV photogrammetry and structure from motion to assess calving dynamics at Store Glacier, a large outlet draining the Greenland ice sheet. *The Cryosphere*, Vol. 9(1), pp. 1–11.
- Sairam, N., Nagarajan, S. & Ornitz, S., 2016. Development of mobile mapping system for 3d road asset inventory. *Sensors*, Vol. 16, p. 367.
- Scaramuzza, D., Harati, A. & Siegwart, R., 2007. Extrinsic self-calibration of a camera and a 3D laser range finder from natural scenes. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, CA, USA, 29 October–2 November 2007, pp. 4164–4169.
- Schneider, J., Stachniss, C. & Förstner, W., 2016. On the Accuracy of Dense Fisheye Stereo. *IEEE Robot. Autom. Lett.*, Vol. 1(1), pp. 227–234.
- Schwarz, K., Martell, H., El-Sheimy, N., Chapman, M. & Cosandier, D., 1993. VISAT - A Mobile Highway Survey System of High Accuracy. *Proceedings of the Vehicle Navigation and Information Systems Conference*, Ottawa, pp. 476–481.
- Slattery, K., Slattery, D. & Peterson, J., 2012. Road construction earthwork volume calculation using three-dimensional laser scanning. *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 138(2), pp. 96–99.
- Smith, M. W., Carrivick, J. L., & Quincey, D. J., 2015. Structure from motion photogrammetry in physical geography, *Progress in Physical Geography*, Vol. 40(2), pp. 247–275.
- Snively, N., 2008. Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections. Ph.D. Thesis, University of Washington, Seattle, WA, USA.
- Strecha, C., Zoller, R., Rutishauser, S., Brot, B., Schneider-Zapp, K., Chovancova, V., Krull, M. & Glassey, L., 2015. Quality Assessment of 3D Reconstruction Using Fisheye and Perspective Sensors. In: *Int. Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Munich, Germany, Vol. II-3/W4. pp. 215–222.
- Talaya, J., R. Alamus, E. Bosch, A. Serra, W. Kornus, A. Baron, Integration of a Terrestrial Laser Scanner with GPS/IMU Orientation Sensors, *Proceedings of XXth ISPRS Congress, Commision 5*, Istanbul, Turkey, July 12–23, 2004.
- Tao, C.V., 2000. Mobile mapping technology for road network data acquisition. *Journal of Geospatial Engineering*, Vol. 2(2), pp. 1–14.
- Toschi, I., Rodríguez-Gonzálvez, P., Remondino, F., Minto, S., Orlandini, S. & Fuller, A., Accuracy evaluation of a mobile mapping system with advanced statistical methods. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 40(5), p. 245.

Tsai, M. J. & Han, J. Y. 2013. A preliminary study on the road surface feature extraction using MMS collected point clouds, Proceedings of the 34rd Asian Conference on Remote Sensing, October 20–24, Bali, Indonesia.

Tsai, R.Y., 1986. An efficient and accurate camera calibration technique for 3-D machine vision. In: Proc. International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, USA, pp. 364–374.

Unnikrishnan, R. & Hebert, M., 2005. Fast extrinsic calibration of a laser rangefinder to a camera. Robotics Institute, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU-RI-TR-05-09.

Vaaja, M., Kukko, A., Kaartinen, H., Kurkela, M., Kasvi, E., Flener, C., Hyyppä, H., Hyyppä, J., Järvelä, J. & Alho, P., 2013. Data processing and quality evaluation of a boat-based mobile laser scanning system. *Sensors*, Vol. 13, pp. 12497–12515.

Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M. & Reynolds, J., 2012. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, Vol. 179, pp. 300–314.

Williams, K., Olsen, M., Roe, G., Glennie, C., 2013. Synthesis of transportation applications of mobile LiDAR. *Remote Sensing*, Vol. 5(9), pp. 4652–4692.

Zhang, Q. & Pless, R., Extrinsic calibration of a camera and laser range finder (improves camera calibration). *IEEE Intl. Conf. Intel. Robots and Sys.*, Vol. 3, Sept 2004, pp. 2301–2306.

Zhang, Z., 2000. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 22(11), pp. 1330–1334.

Zhao, W., Nister, D. & Hsu, S., 2005. Alignment of continuous video onto 3D point clouds. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, Vol. 27(8), pp. 1305–1318.

Zhou, H., Jalayer, M., Gong, J., Hu, S. & Grinter, M., 2013. Investigation of Methods and Approaches for Collecting and Recording Highway Inventory Data, FHWAICT, 13-022, Illinois Department of Transportation, Springfield, IL.

Zhuang, Y., He, G., Hu, H., Wu, Z., 2015. A novel outdoor scene-understanding framework for unmanned ground vehicles with 3d laser scanners. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol. 37(4), pp. 435–445.

Ziparo, V.A, Zaratti, M., Grisetti, G., Bonanni, T.M., Serafin, J., Di Cicco, M., Proesmans, M., Van Gool, L., Vysotska, O., Bogoslavskyi, I., Stachniss, C., 2013. Exploration and mapping of catacombs with mobile robots. *IEEE international symposium on safety, security, and rescue robotics (SSRR)*, pp. 21–26.

Eisenbeiß, H., 2009. UAV Photogrammetry, Dissertation Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland.

Liiteluettelo

Liite 1. POSPac MMS 8.3 Diagnostic QC Report. 38 sivua.

Liite 2. Agisoft Photoscan Processing Report. 7 sivua.

Liite 1. POSPac MMS 8.3 Diagnostic QC Report

POSPac MMS 8.3 Diagnostic QC Report - report_Mission 1.pdf - 08/06/2018 14:22:36

General Information

Mission Information

Project name	02082018
Processing date	2018-08-06 11:19:25
Mission date	2018-08-02 07:33:35
Mission duration	02:25:36.000
Processing mode	IN-Fusion SmartBase
GPS Station	ASB

Rover Hardware Information

Product	POS MV 220 VER5 HW2.5-12
Serial number	S/N7950
IMU type	42
Receiver type	BD982
Antenna type	AT1675-382

Project File List

Rover Data Files

File name	File type
default.066	POS Data
default.067	POS Data
default.068	POS Data
default.069	POS Data
default.070	POS Data
default.071	POS Data
default.072	POS Data
default.073	POS Data
default.074	POS Data
default.075	POS Data
default.076	POS Data
default.077	POS Data
default.078	POS Data
default.079	POS Data
default.080	POS Data
default.081	POS Data
default.082	POS Data
default.083	POS Data
default.084	POS Data
default.085	POS Data
default.086	POS Data
default.087	POS Data
default.088	POS Data
default.089	POS Data
default.090	POS Data
default.091	POS Data
default.092	POS Data
default.093	POS Data
default.094	POS Data
default.095	POS Data
default.096	POS Data
default.097	POS Data
default.098	POS Data
default.099	POS Data
default.100	POS Data
default.101	POS Data
default.102	POS Data
default.103	POS Data
default.104	POS Data
default.105	POS Data
default.106	POS Data
default.107	POS Data
default.108	POS Data
default.109	POS Data
default.110	POS Data
default.111	POS Data
default.112	POS Data
default.113	POS Data
default.114	POS Data

Input Files

File Name	File type
Ephm2140.18g	GLONASS Broadcast Ephemeris
Ephm2140.18n	GPS Broadcast Ephemeris
aane214h00.18o	GNSS SingleBase
hart214h00.18o	GNSS SingleBase
jyva214h00.18o	GNSS SingleBase
rala214h00.18o	GNSS SingleBase
vilp214h00.18o	GNSS SingleBase

POSPac MMS 8.3 Diagnostic QC Report - report_Mission 1.pdf - 08/06/2018 14:22:36

File Name	File type
igr20124.sp3	GPS Precise Ephemeris

Output Files

Filename	File type
sbt_Mission 1.out	SBET Trajectory File

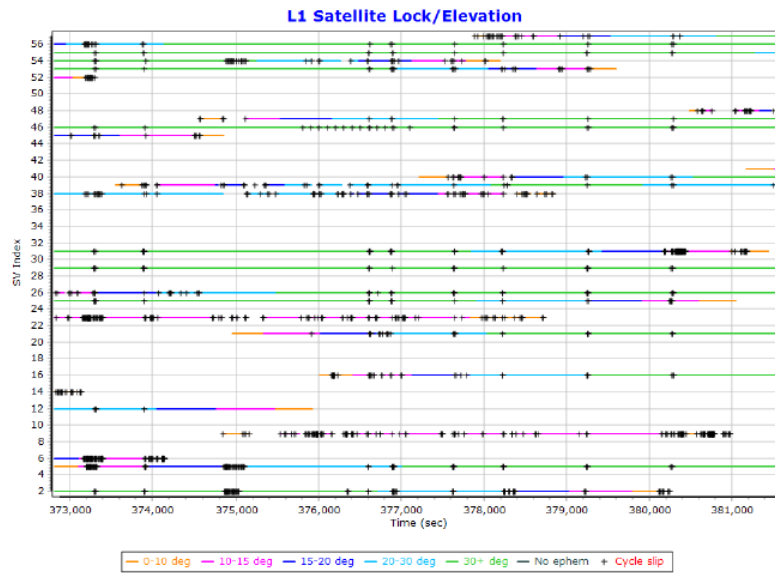
POSPac MMS 8.3 Diagnostic QC Report - report_Mission 1.pdf - 08/06/2018 14:22:36

Rover Data Summary

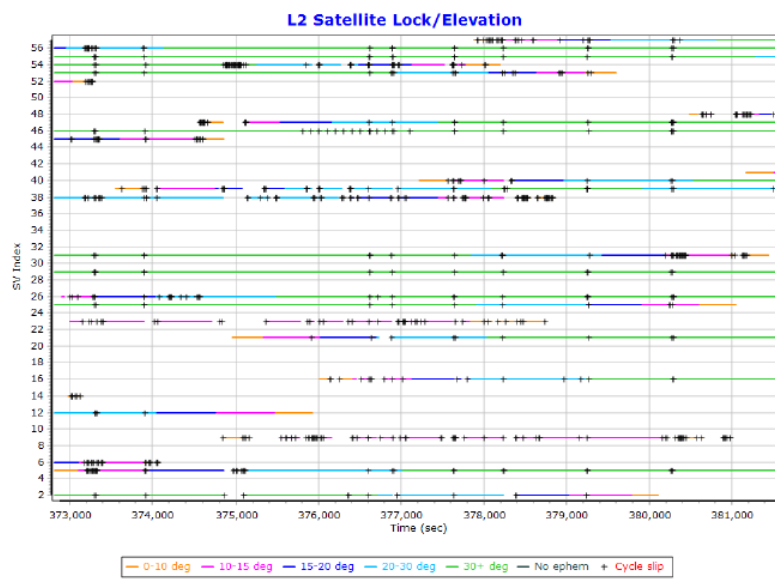
First raw data file	default.066		
Last raw data file	default.114		
Start GPS week	2012		
Start time	372796.300 (8/2/2018 7:33:16 AM)		
End time	381532.428 (8/2/2018 9:58:52 AM)		
Start of fine alignment	372816.876 (8/2/2018 7:33:36 AM)		
Available subsystems	Primary GNSS, Secondary GNSS, IMU		
POS Event Input	None		
Correction data	DGPS/GNSS RTCM V3, DGPS/GNSS RTCM		
IMU Installation Lever Arms & Mounting Angles			
Reference to IMU lever arm [m]	0.000	0.000	0.000
Reference to IMU mounting angles [deg]	0.000	0.000	0.000
Reference to Primary GNSS lever arm [m]	0.935	0.615	-1.886
Reference to Primary GNSS lever arm std dev [m]	-1.000		
Reference to Secondary GNSS lever arm [m]	0.000	0.000	0.000
Vehicle to Reference mounting angles [deg]	0.000	0.000	0.000

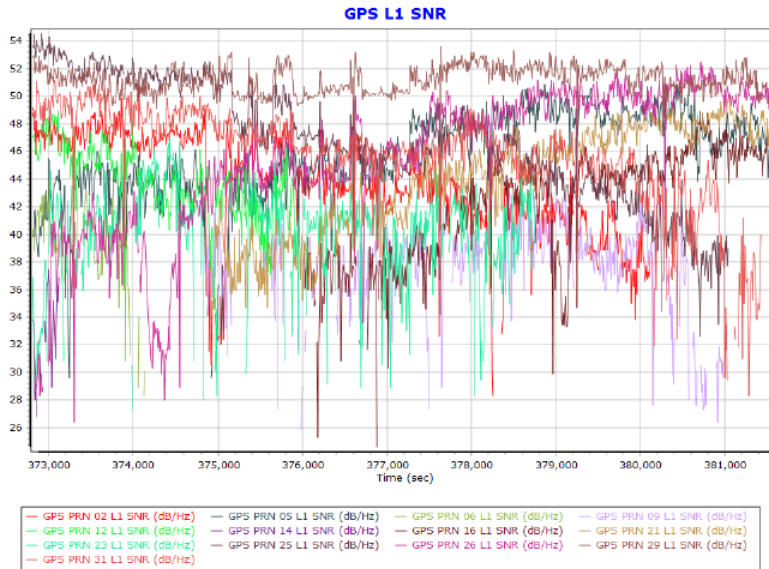
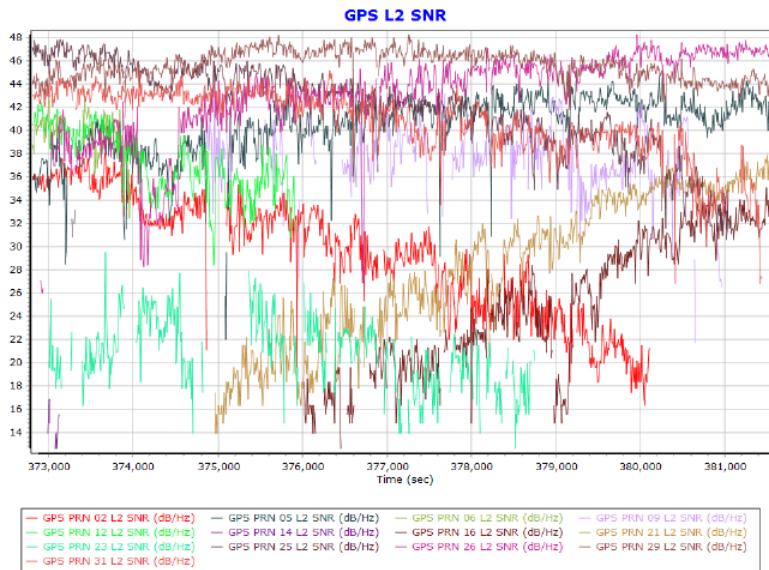
Raw Data QC

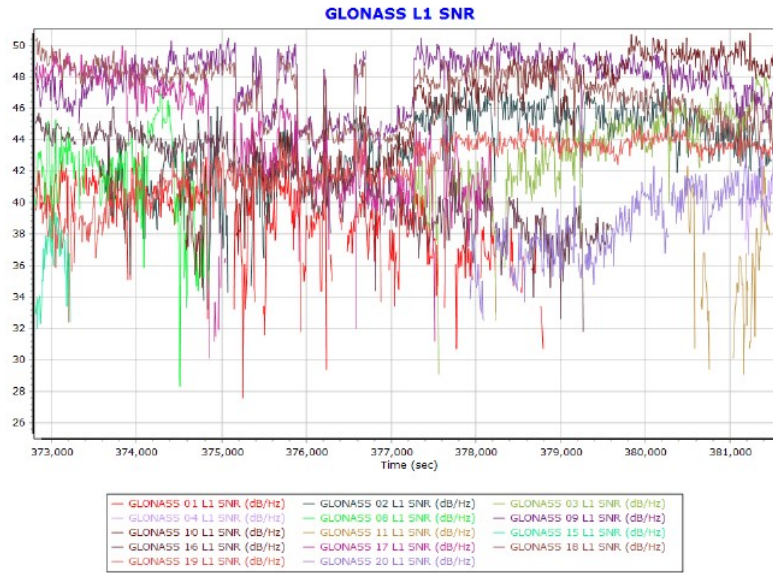
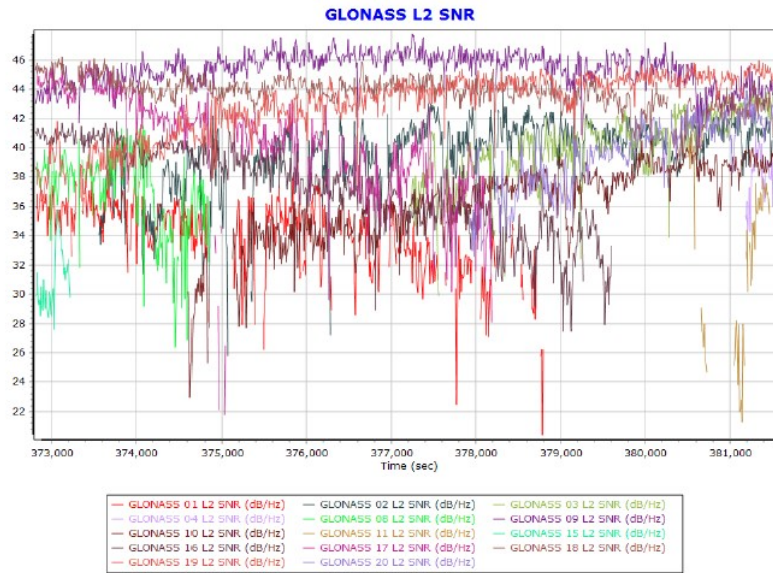
L1 Satellite Lock/Elevation



L2 Satellite Lock/Elevation

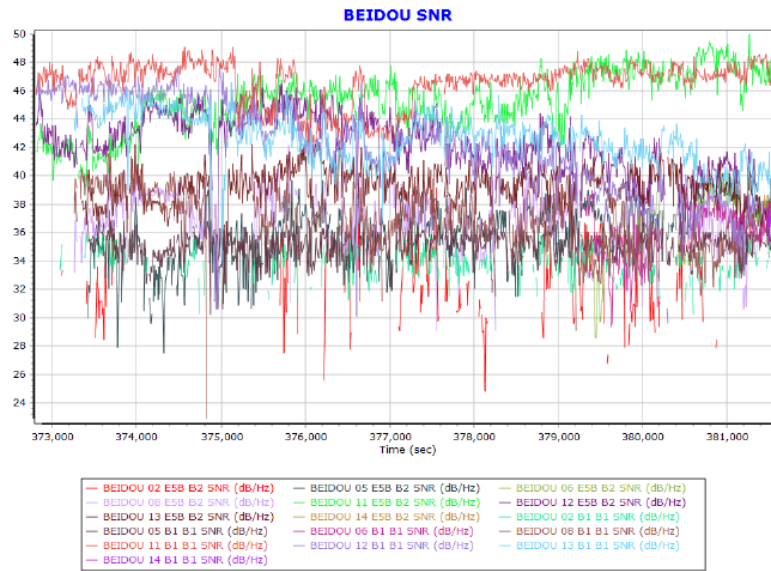


GPS L1 SNR**GPS L2 SNR**

GLONASS L1 SNR**GLONASS L2 SNR**

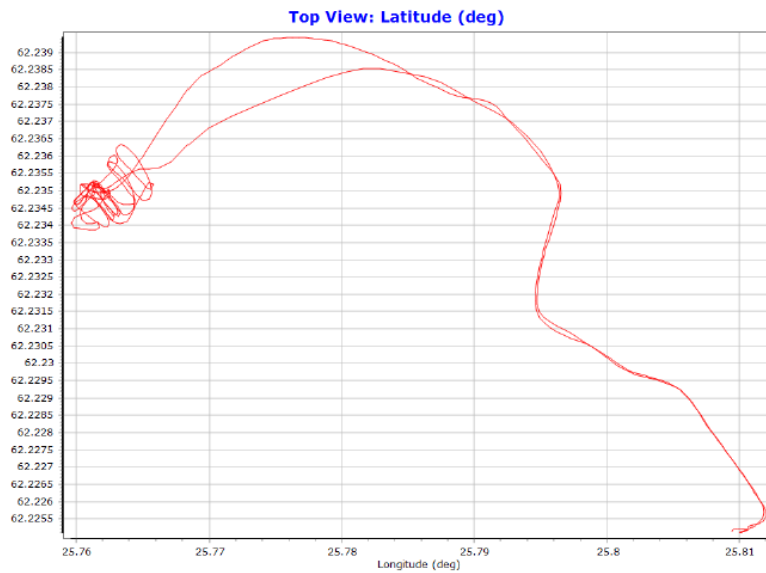
POSPac MMS 8.3 Diagnostic QC Report - report_Mission 1.pdf - 08/06/2018 14:22:36

BEIDOU SNR

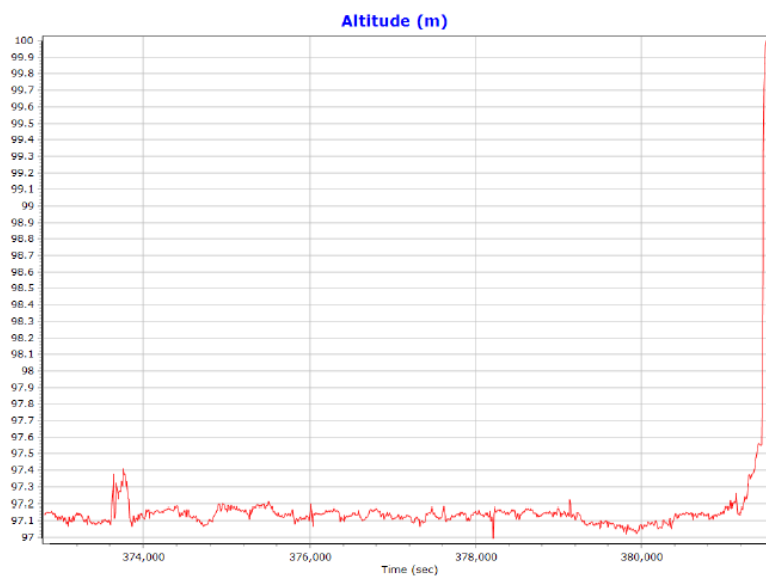


Trajectory Information

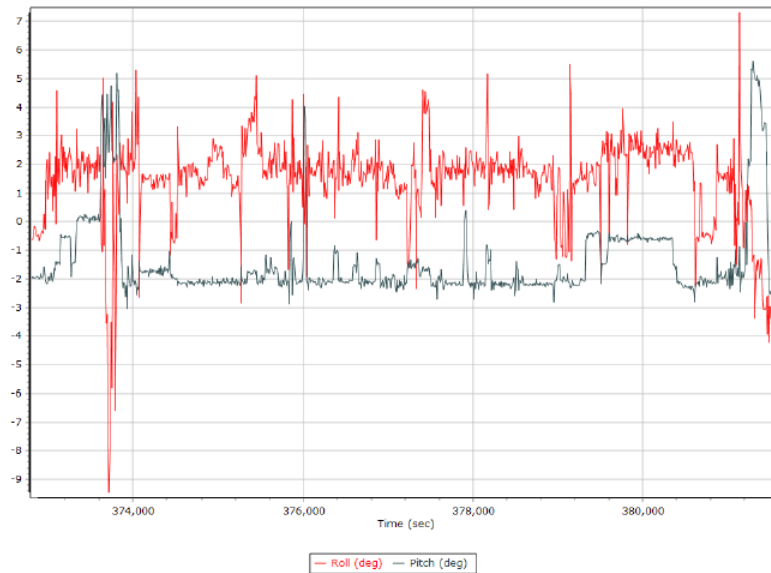
Top View



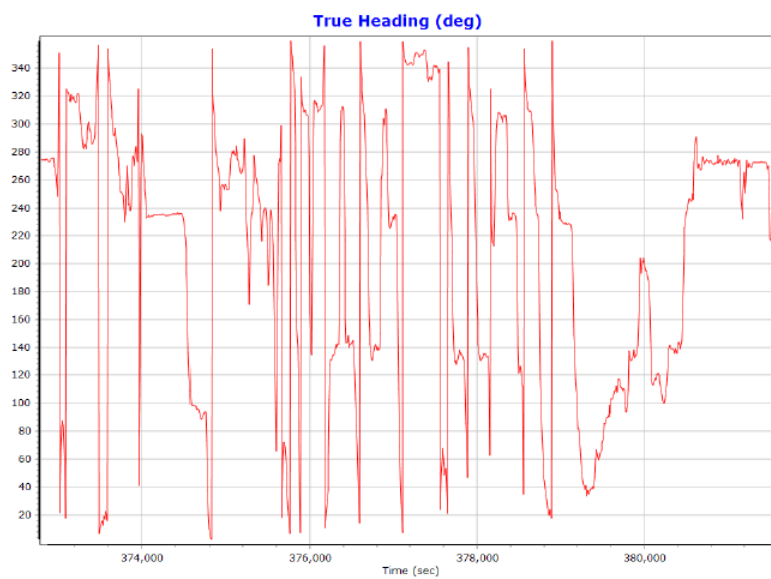
Altitude

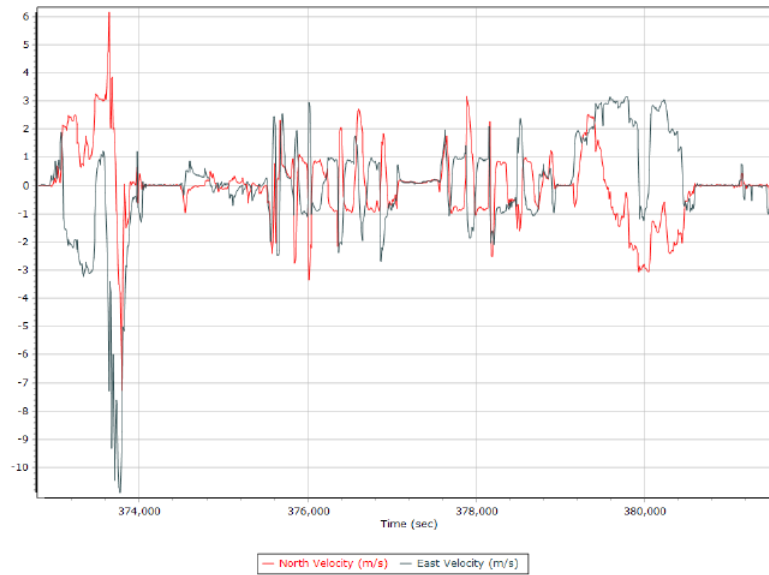
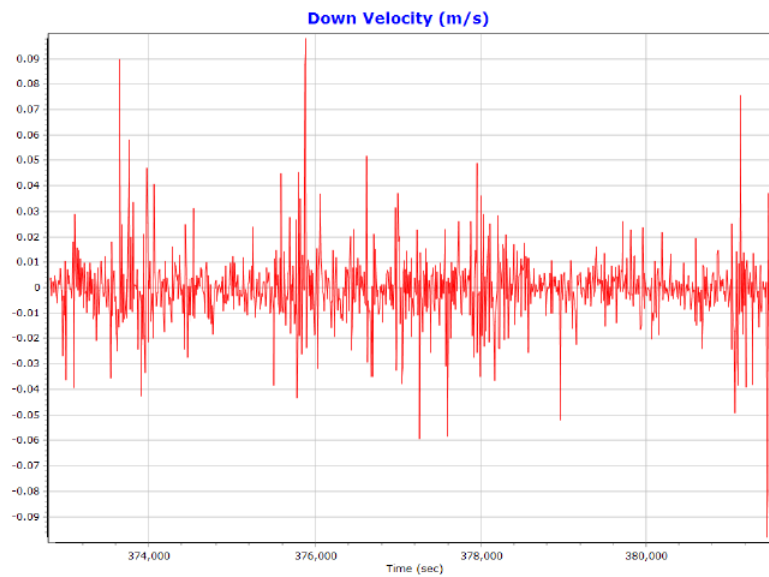


Roll/Pitch



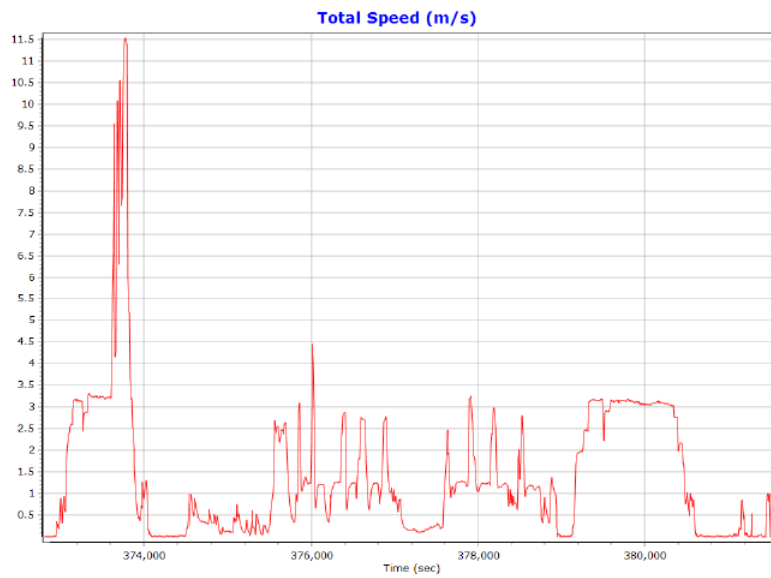
Heading



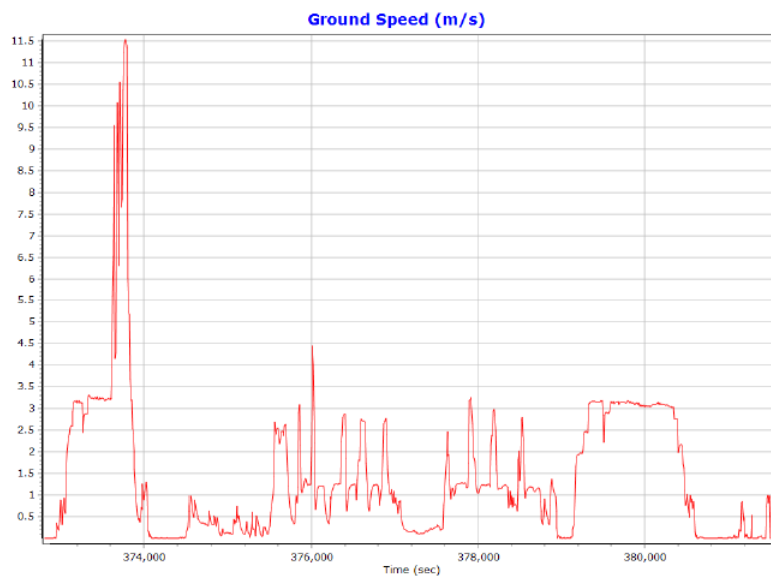
North/East Velocity**Down Velocity**

POSPac MMS 8.3 Diagnostic QC Report - report_Mission 1.pdf - 08/06/2018 14:22:36

Total Speed



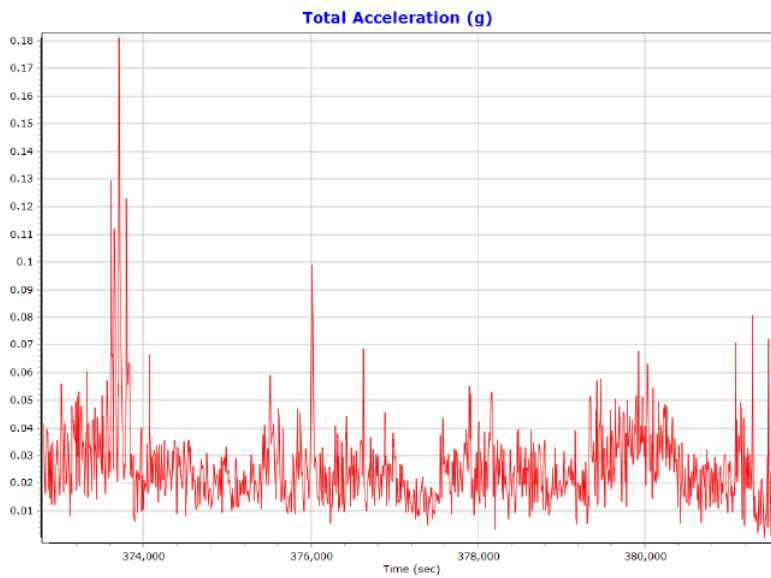
Ground Speed



Body Acceleration



Total Body Acceleration



POSPac MMS 8.3 Diagnostic QC Report - report_Mission 1.pdf - 08/06/2018 14:22:36

Body Angular Rate



SmartBase Processing Summary

Smart Select Options

Archive enabled	False
User database enabled	False
Include high-rate data sites	False
Target GNSS Selection	GNSS

Basestation Selection

Date	ID	Dist	Data Type	Rate	Service	Database	Status
------	----	------	-----------	------	---------	----------	--------

SmartBase Results

SmartBase status	
Primary station id	
Primary station data rate [sec]	0.0
VRS/ASB generation rate [sec]	0.0
VRS/ASB timespan	
Number of reference stations	0
Primary station GPS measurement usage [%]	0.0
Average number of satellites per epoch	0.0
Max number of GPS stations used	0
Min number of GPS stations used	0
Total full data gap [sec]	0
Total individual satellite data gap [sec]	0
GPS precise vs. broadcast ephemeris used	0.0 % / 0.0 %
Termination Status	

POSPac MMS 8.3 Diagnostic QC Report - report_Mission 1.pdf - 08/06/2018 14:22:36

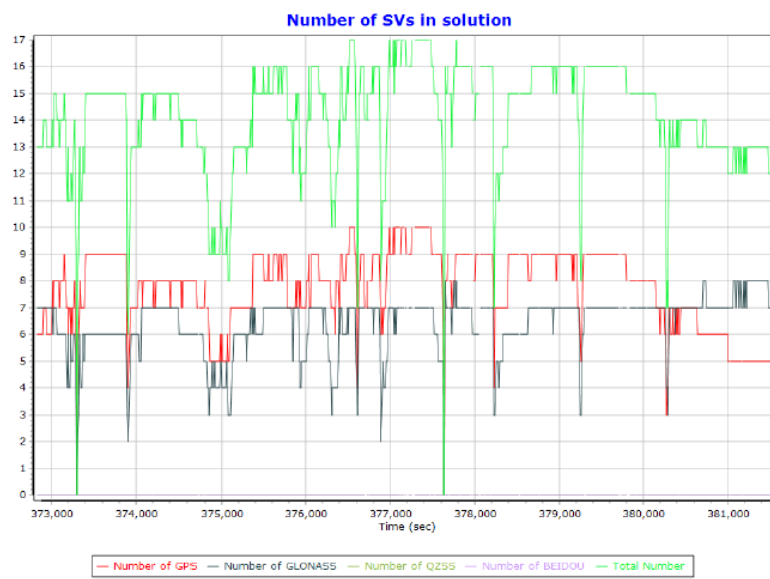
SmartBase Quality Check

GNSS QC

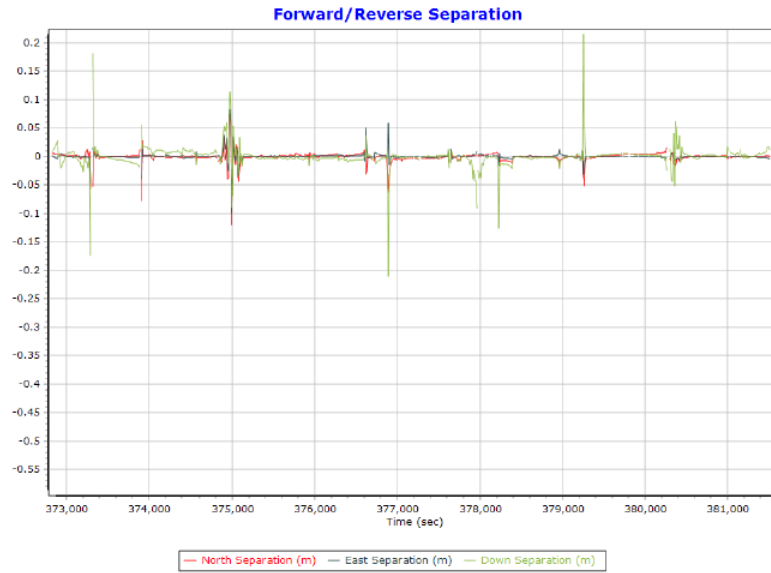
GNSS QC Statistics

Statistics	Min	Max	Mean
Baseline length [km]	0.50	2.06	
Number of GPS SV	3	10	8
Number of GLONASS SV	0	8	6
Number of QZSS SV	0	0	0
Number of BEIDOU SV	0	0	0
Total number of SV	5	17	14
PDOP	1.20	6.47	1.52
QC Solution Gaps	1.00	7.00	
Solution Type	Fixed	Float	No solution
Epoch (s)	8602.00	20.00	76.00
Percentage	98.90	0.23	0.87

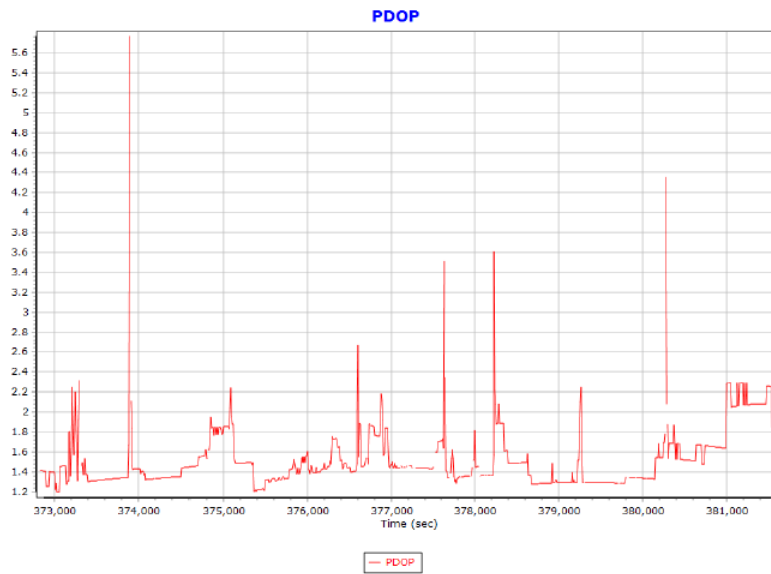
Num SVs in solution



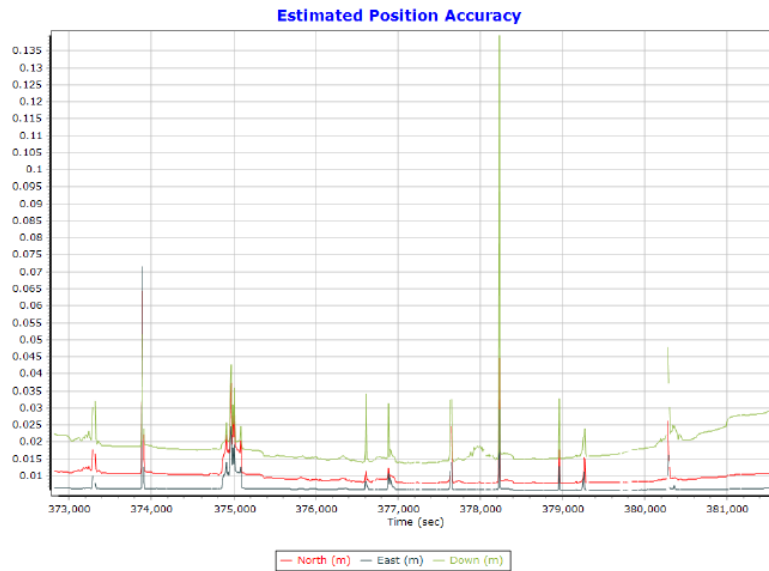
Forward/Reverse Separation



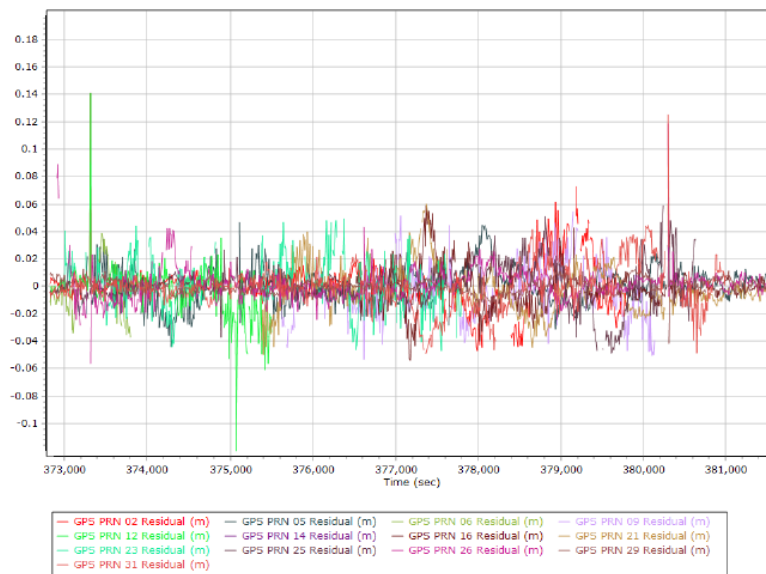
PDOP



Estimated Position Accuracy

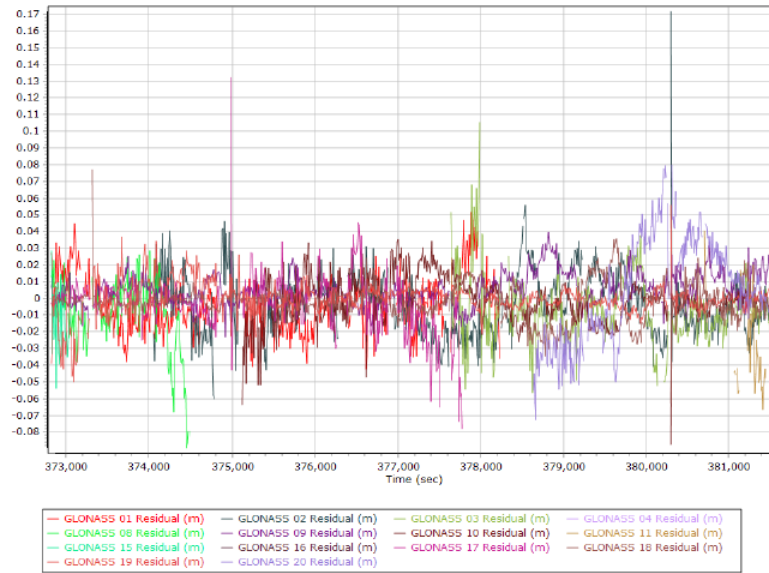


GPS Residuals



POSPac MMS 8.3 Diagnostic QC Report - report_Mission 1.pdf - 08/06/2018 14:22:36

GLONASS Residuals



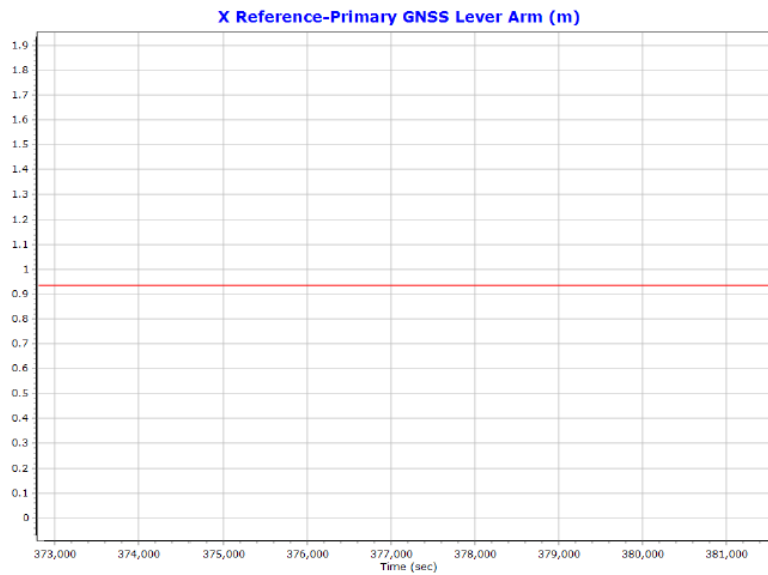
GNSS-Inertial Processor Configuration

Processing mode	IN-Fusion SmartBase		
Stabilized mount	False		
Base station	ASB		
Processing start time	372797.000 (8/2/2018 7:33:17 AM)		
Processing end time	381533.000 (8/2/2018 9:58:53 AM)		
Initial attitude source	GYRO Compass		
IMU Sensor Context	Processing with Onboard IMU		
Reference to IMU lever arm [m]	0.000	0.000	0.000
Reference to IMU mounting angles [deg]	0.000	0.000	0.000
Reference to Primary GNSS lever arm [m]	0.935	0.615	-1.886
Reference to Primary GNSS lever arm std dev [m]	0.030	0.030	0.030
Reference to Primary GNSS lever arm [m]	0.000	0.000	0.000
Reference to Primary GNSS lever arm std dev [m]	0.100	0.100	0.100
Vehicle to Reference mounting angles [deg]	0.000	0.000	0.000

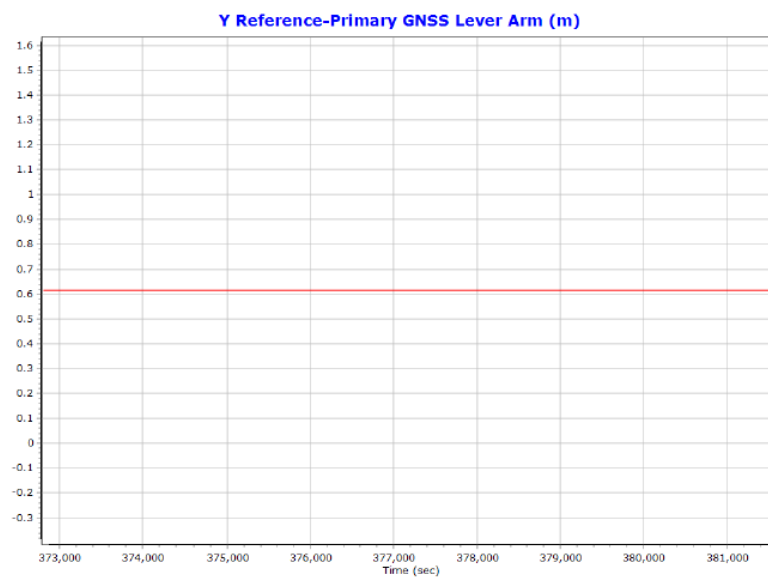
Calibrated Installation Parameters

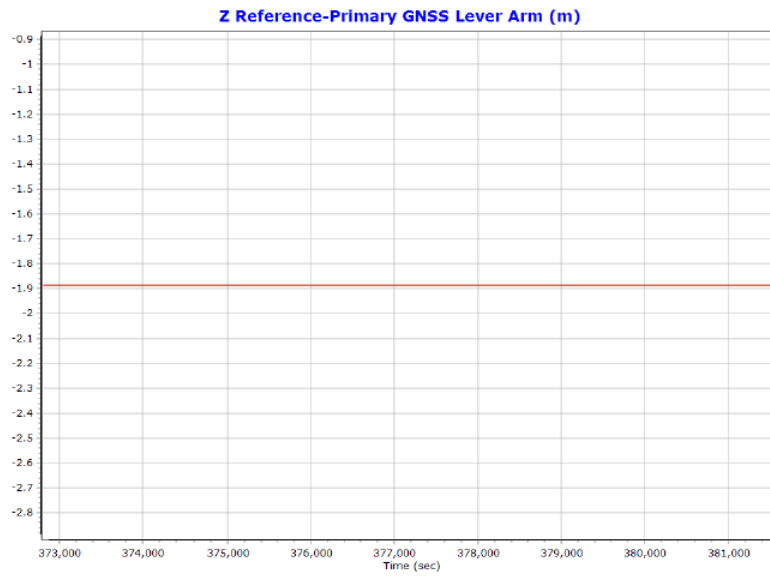
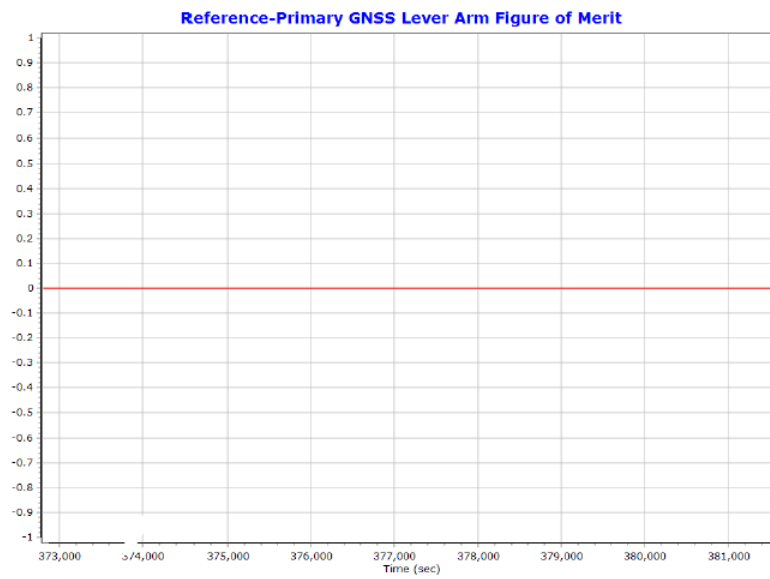
Reference-Primary GNSS Lever Arm

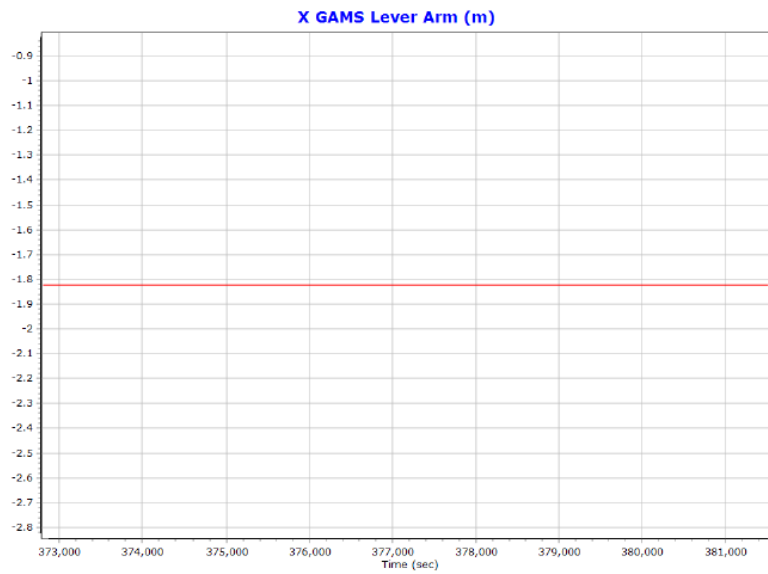
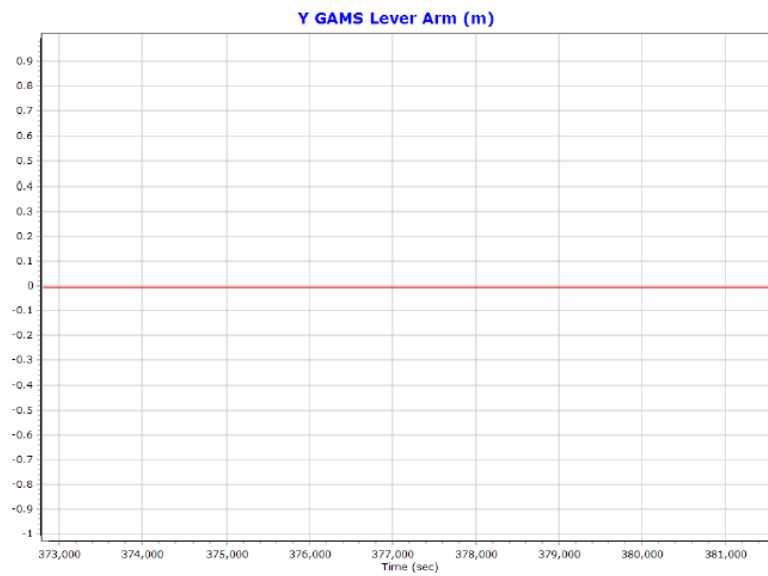
X Reference-Primary GNSS Lever Arm (m)

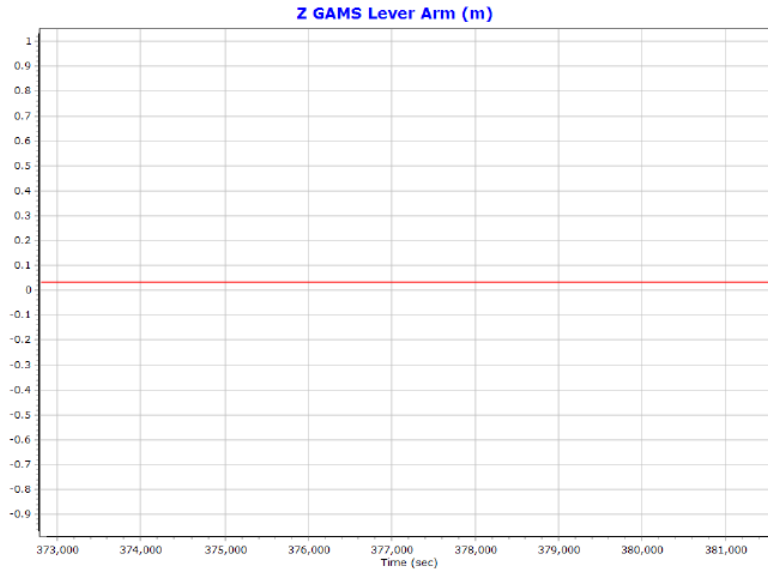
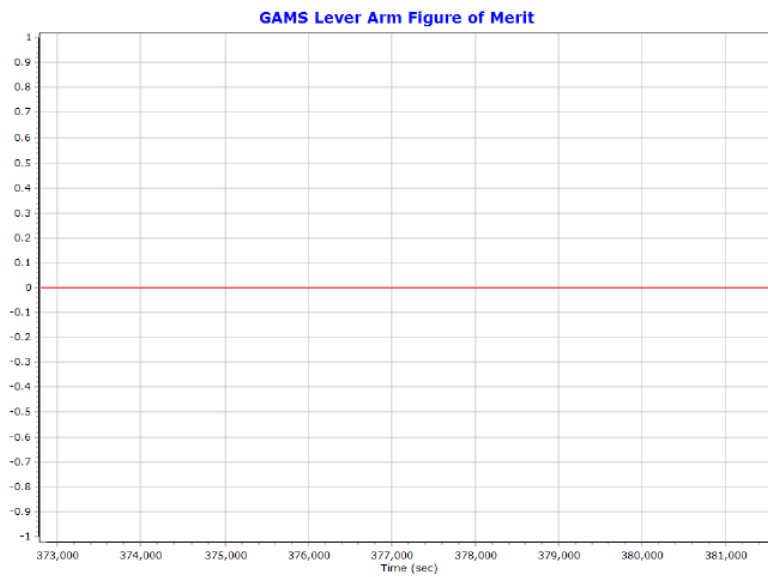


Y Reference-Primary GNSS Lever Arm (m)



Z Reference-Primary GNSS Lever Arm (m)**Reference-Primary GNSS Lever Arm Figure of Merit**

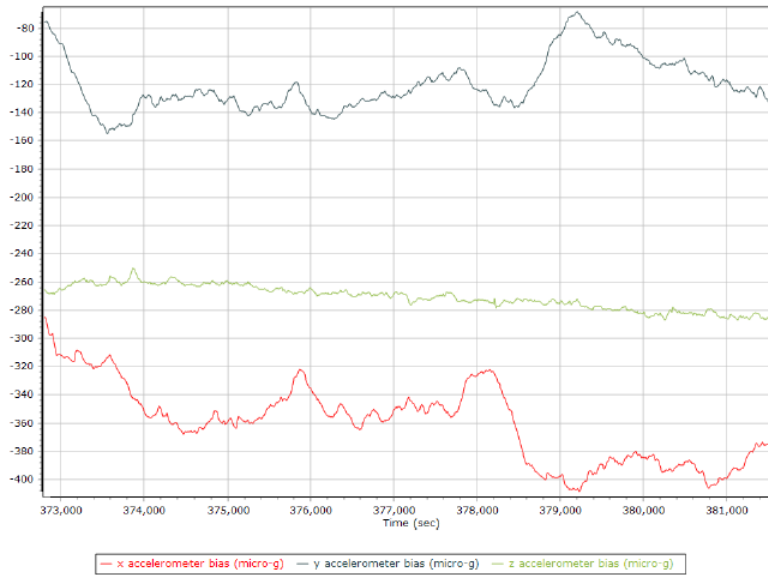
GAMS Lever Arm**X GAMS Lever Arm (m)****Y GAMS Lever Arm (m)**

Z GAMS Lever Arm (m)**GAMS Lever Arm Figure of Merit**

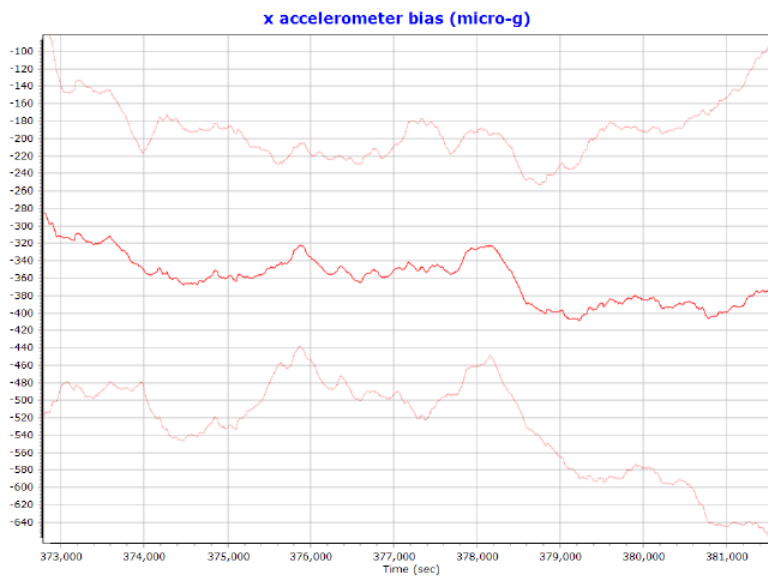
Smoothed IN-Fusion QC

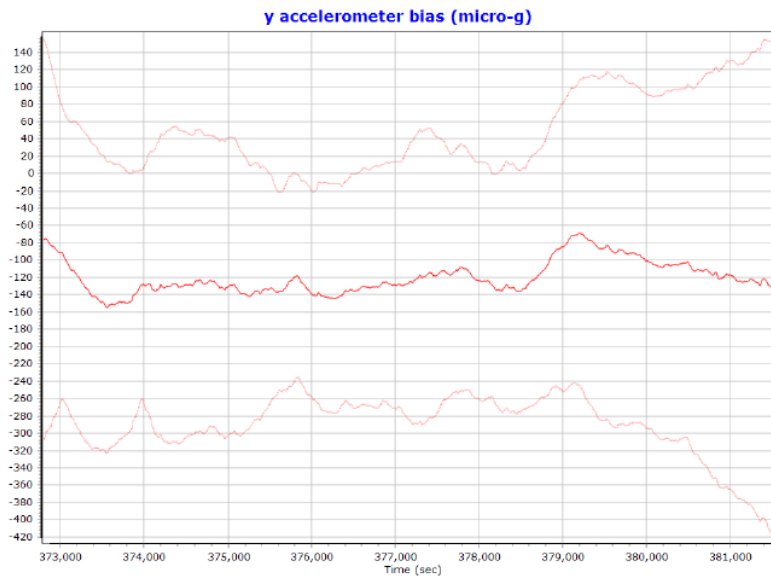
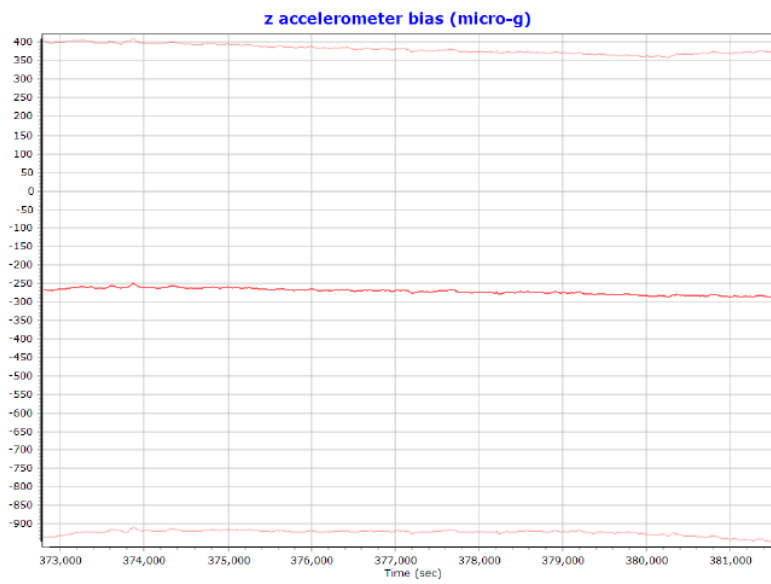
Smoothed Estimated Errors, Reference Frame

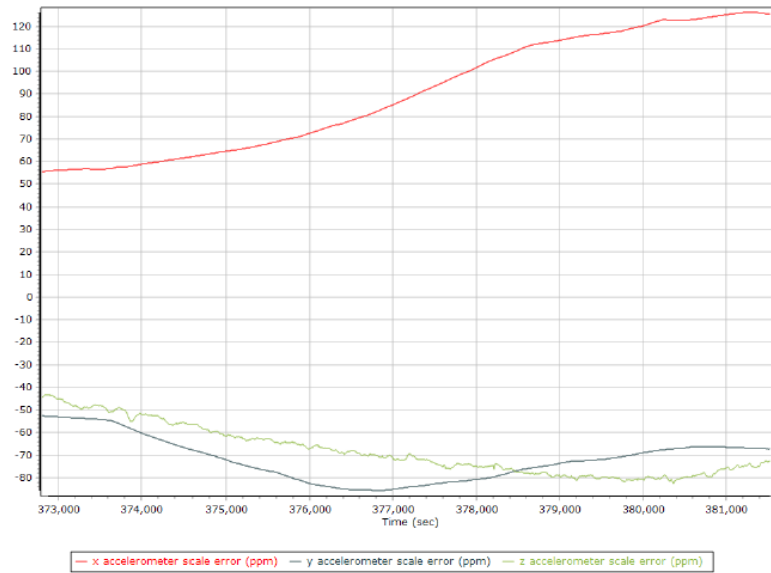
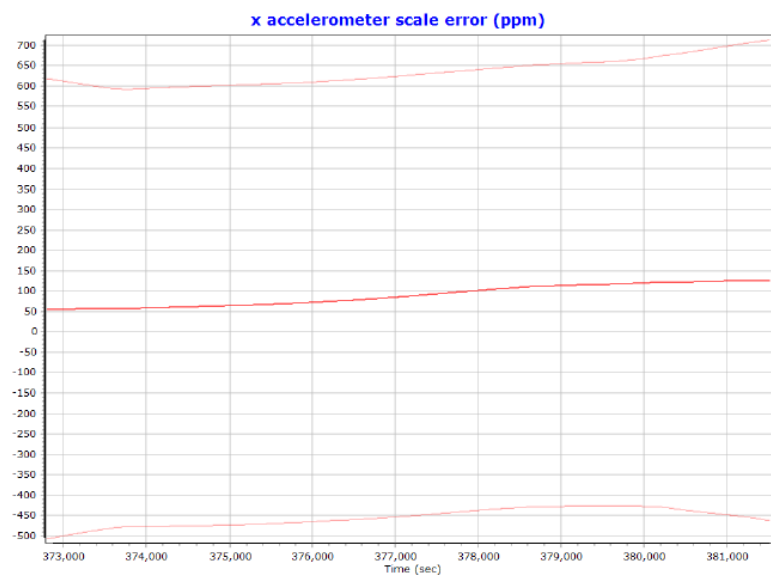
Accelerometer Bias (micro-g)

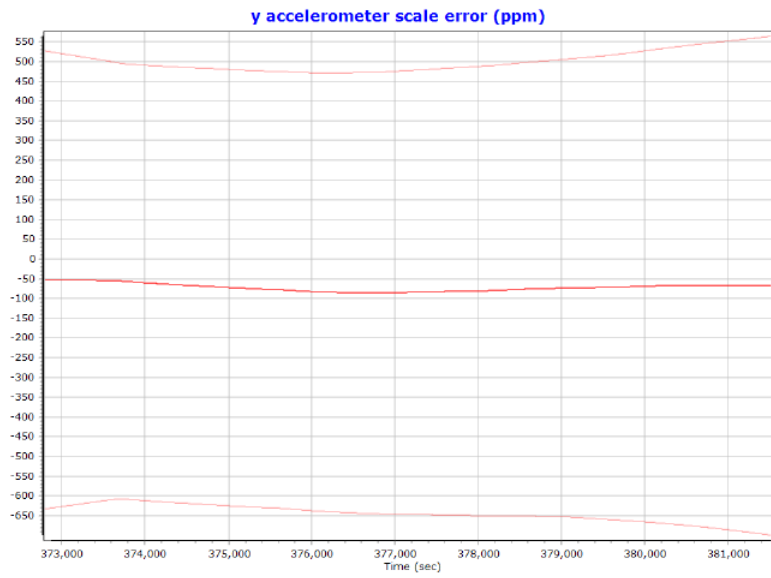
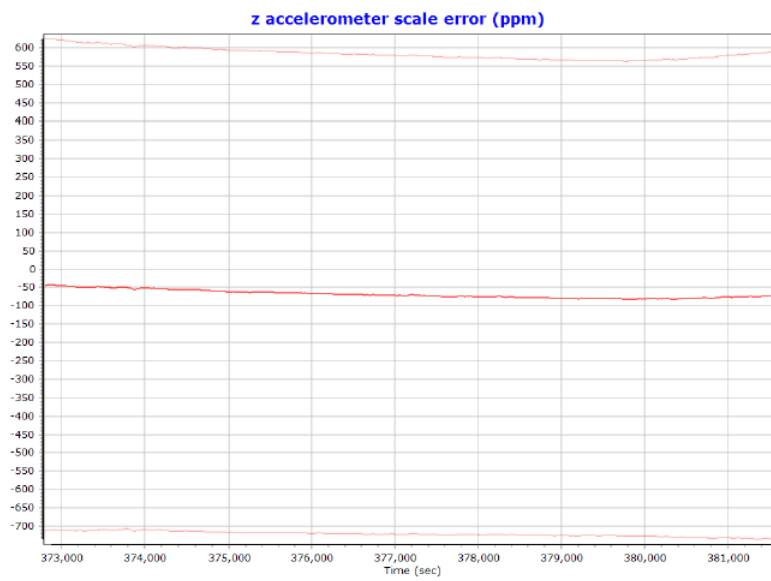


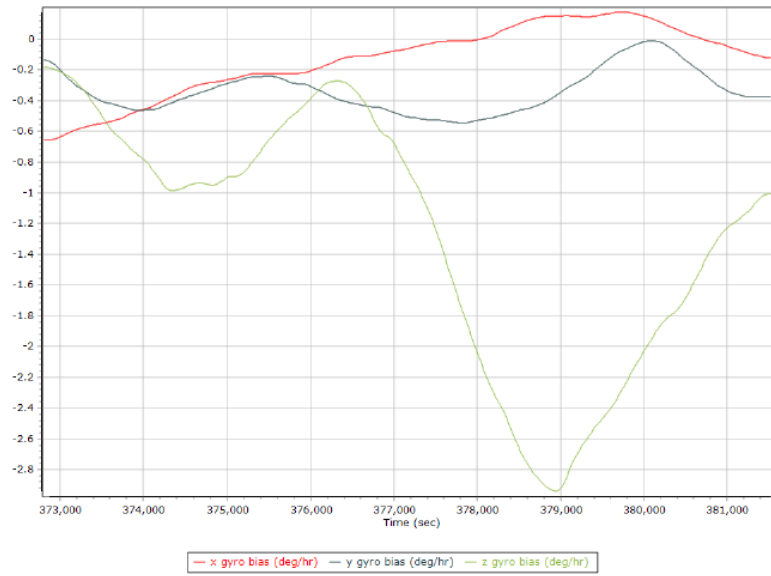
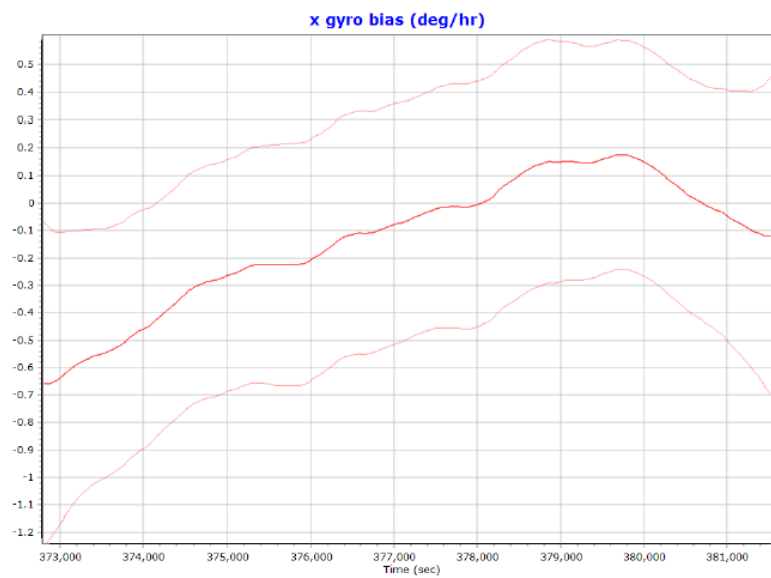
X Accelerometer Bias (micro-g)

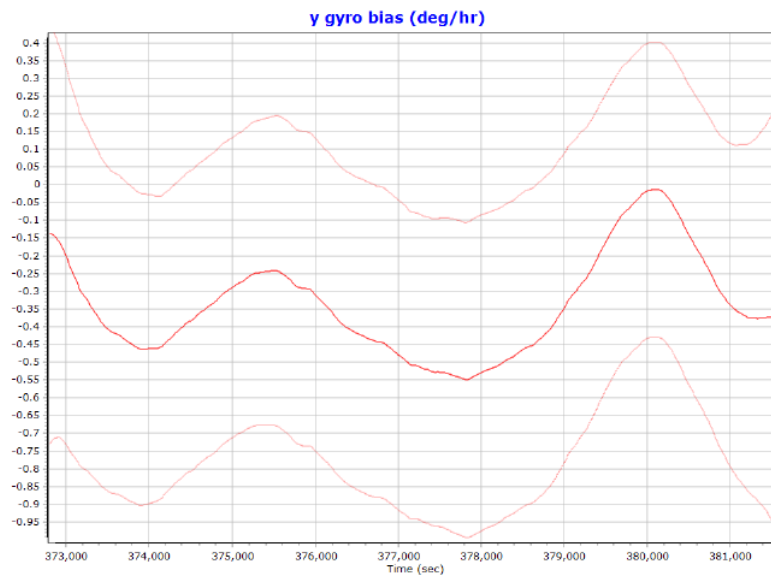
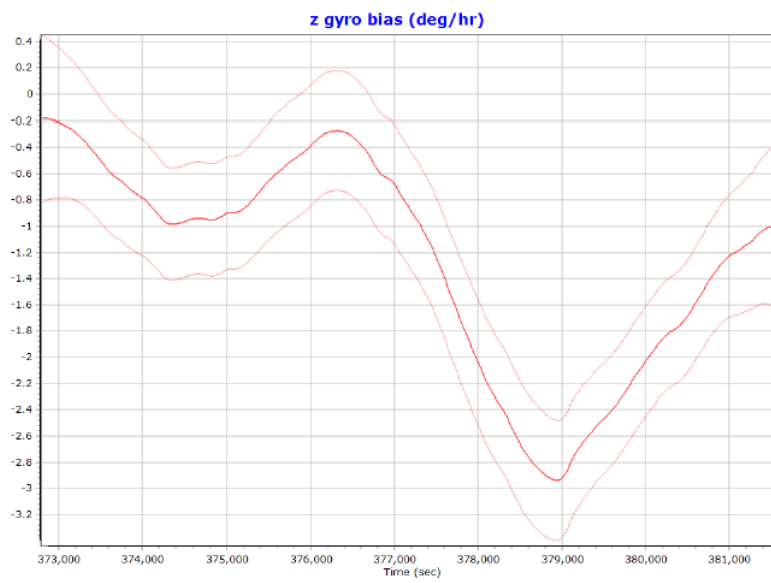


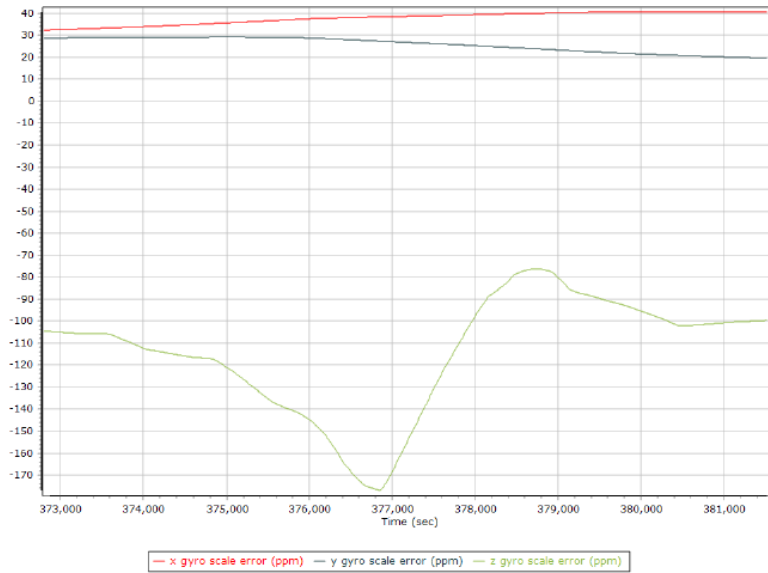
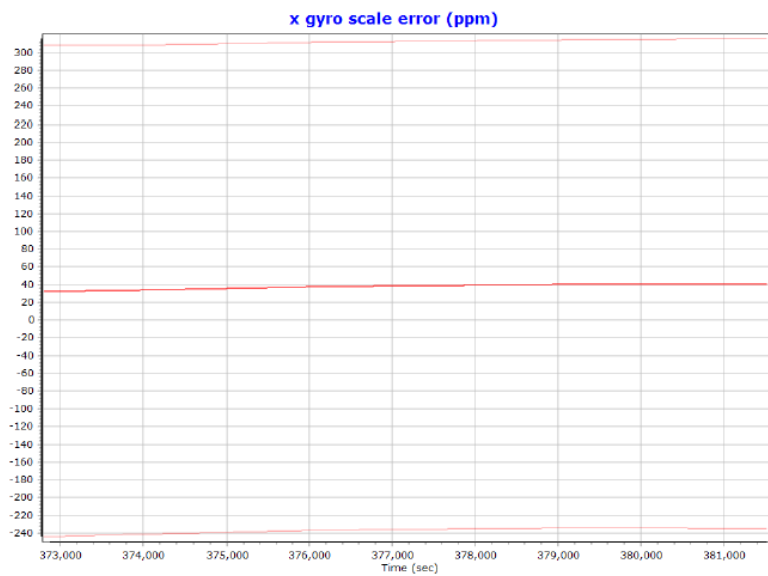
Y Accelerometer Bias (micro-g)**Z Accelerometer Bias (micro-g)**

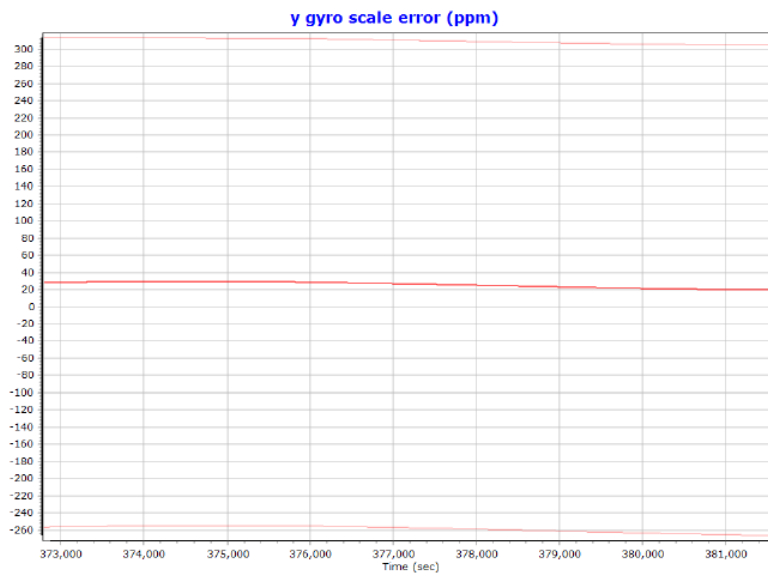
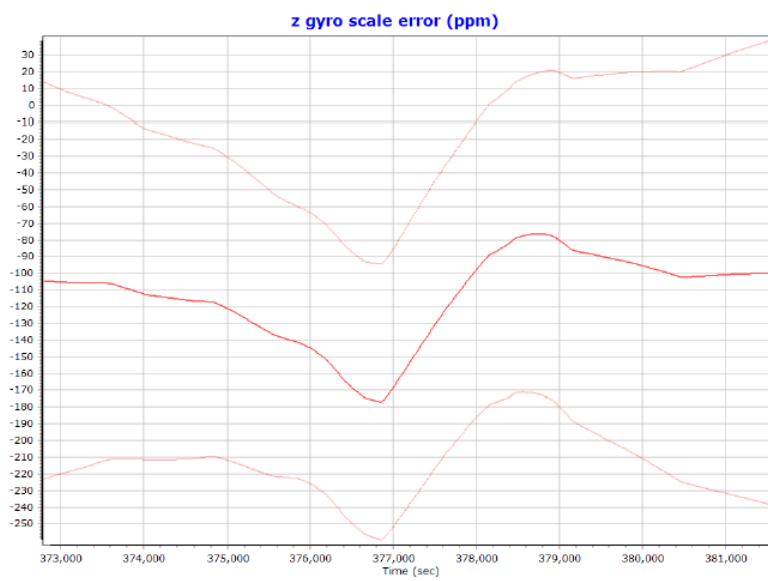
Accelerometer Scale Error (ppm)**X Accelerometer Scale Error (ppm)**

Y Accelerometer Scale Error (ppm)**Z Accelerometer Scale Error (ppm)**

Gyro Bias (deg/h)**X Gyro Bias (deg/h)**

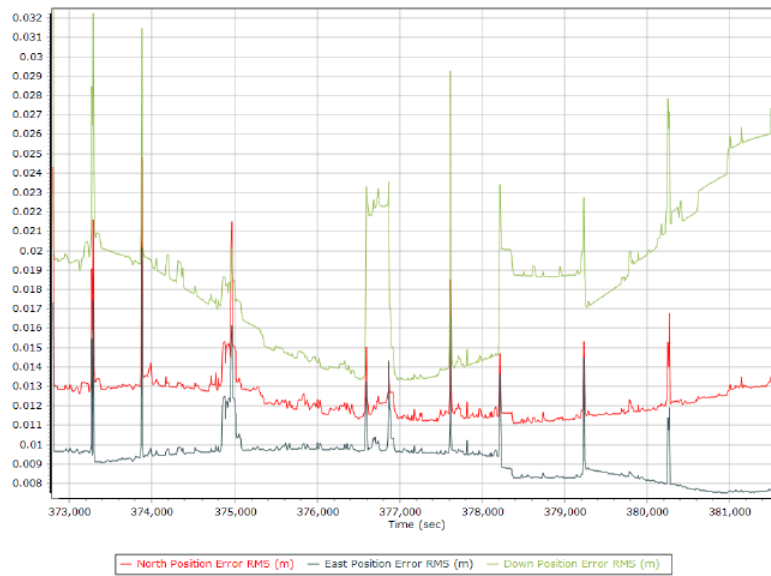
Y Gyro Bias (deg/h)**Z Gyro Bias (deg/h)**

Gyro Scale Error (ppm)**X Gyro Scale Error (ppm)**

Y Gyro Scale Error (ppm)**Z Gyro Scale Error (ppm)**

Smoothed Performance Metrics

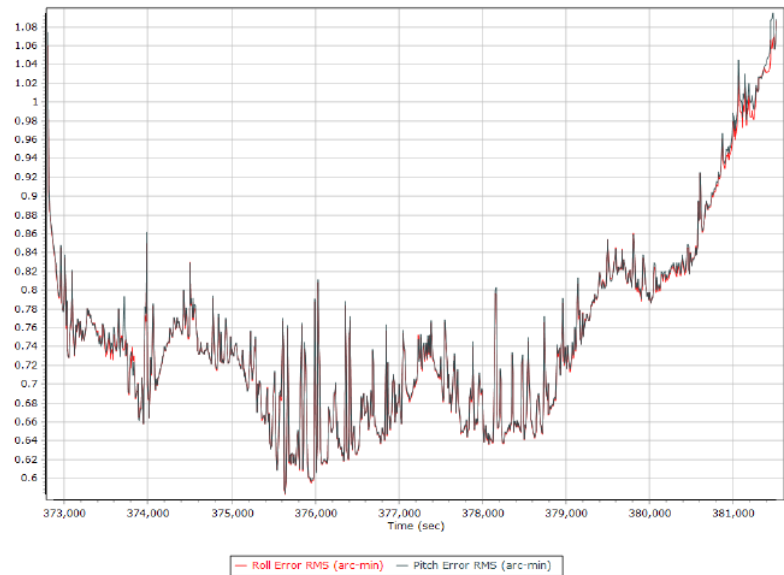
Position Error RMS (m)



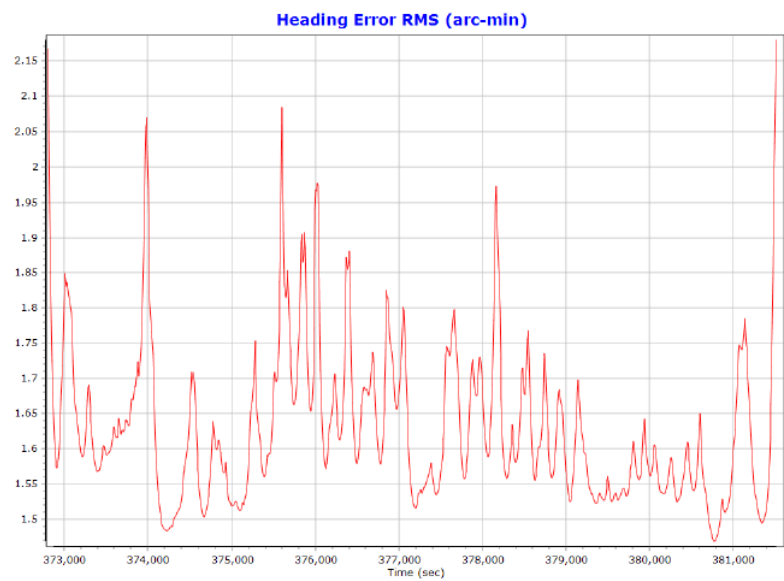
Velocity Error RMS (m/s)



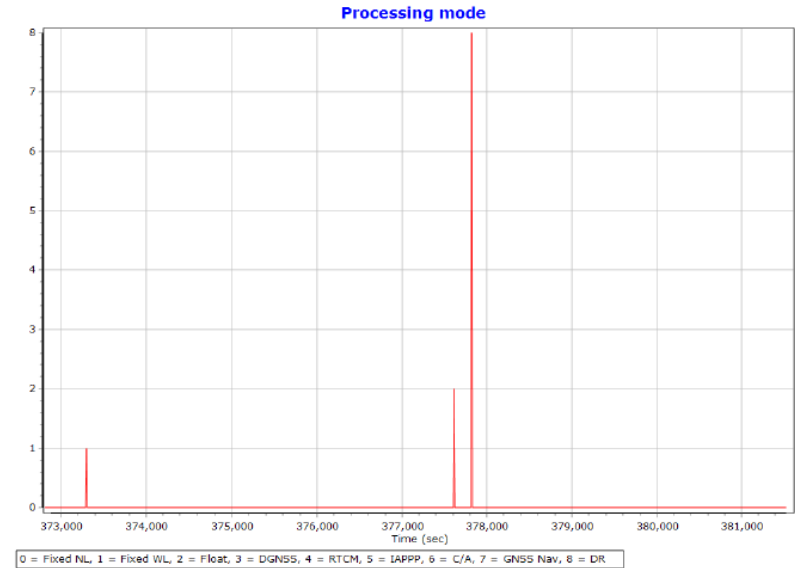
Roll/Pitch Error RMS (arc-min)



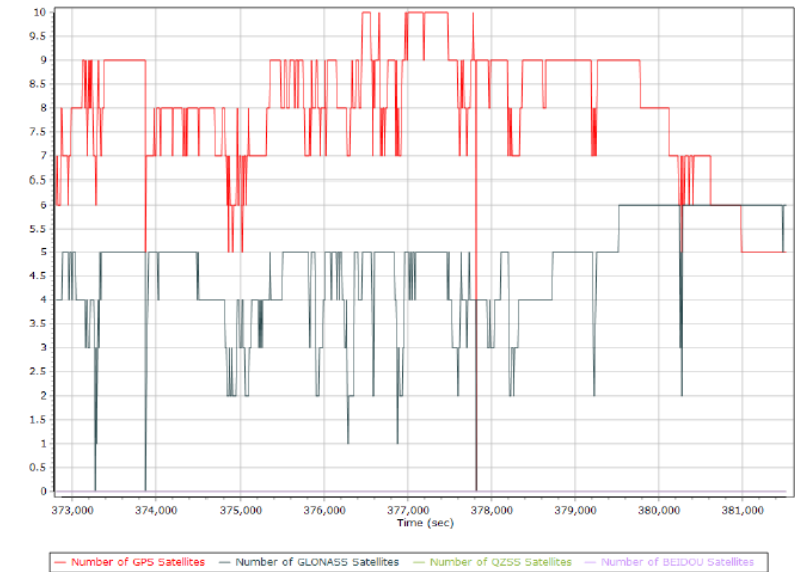
Heading Error RMS (arc-min)

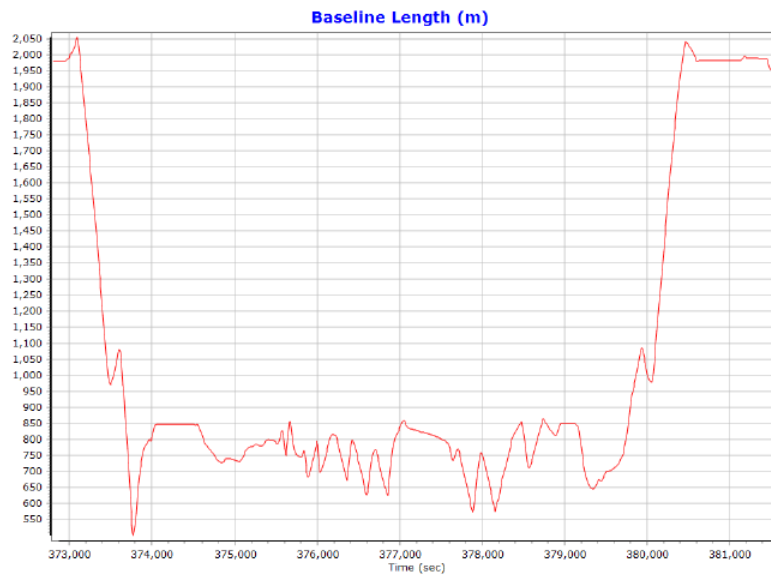
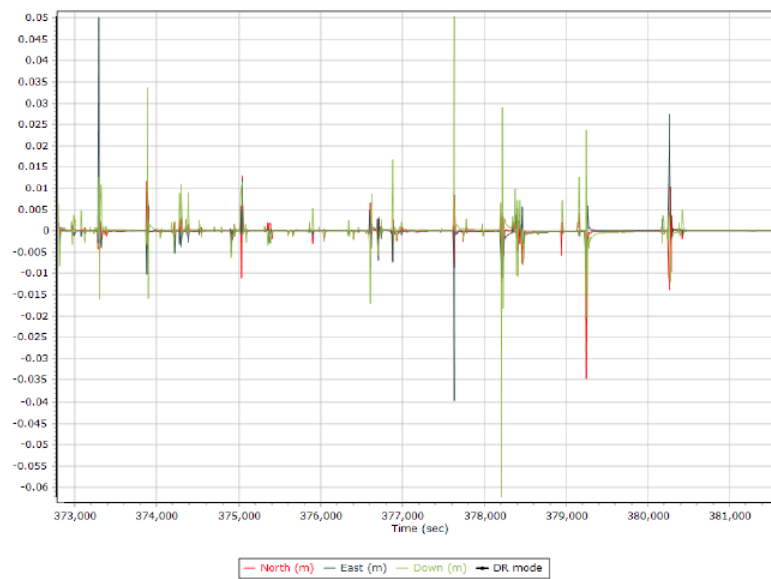


Smoothed Solution Status
Processing Mode

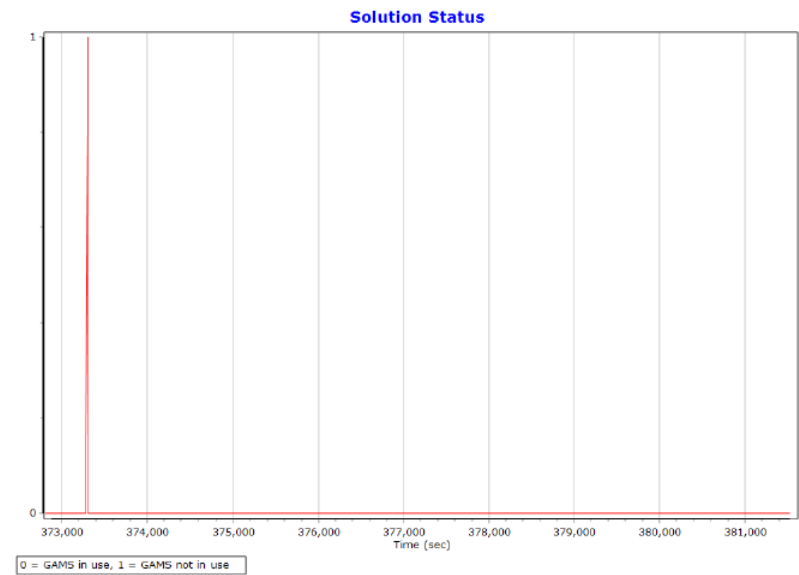


Number of Satellites



Baseline Length**SBET IAKAR Separation**

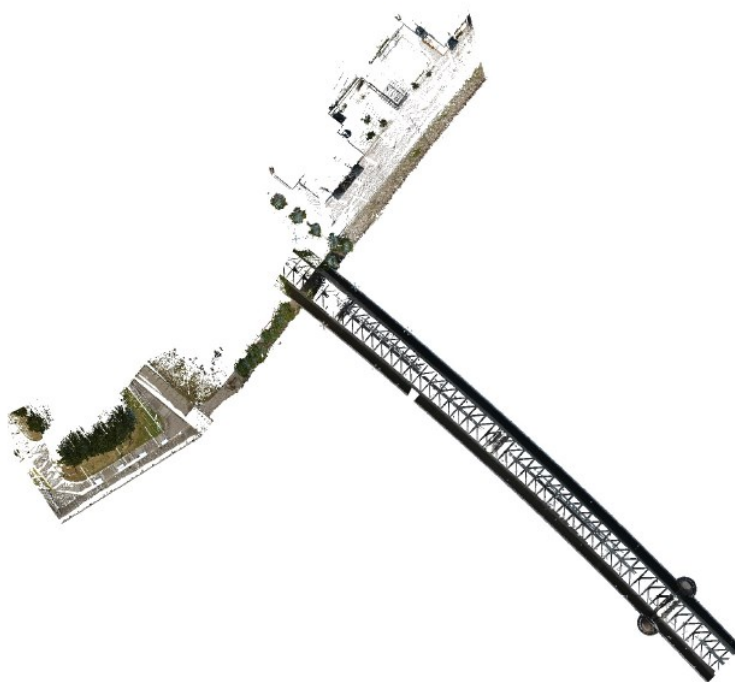
GAMS Solution Status



Liite 2. Agisoft Photoscan Processing Report

Agisoft PhotoScan

Processing Report
23 October 2018



Survey Data

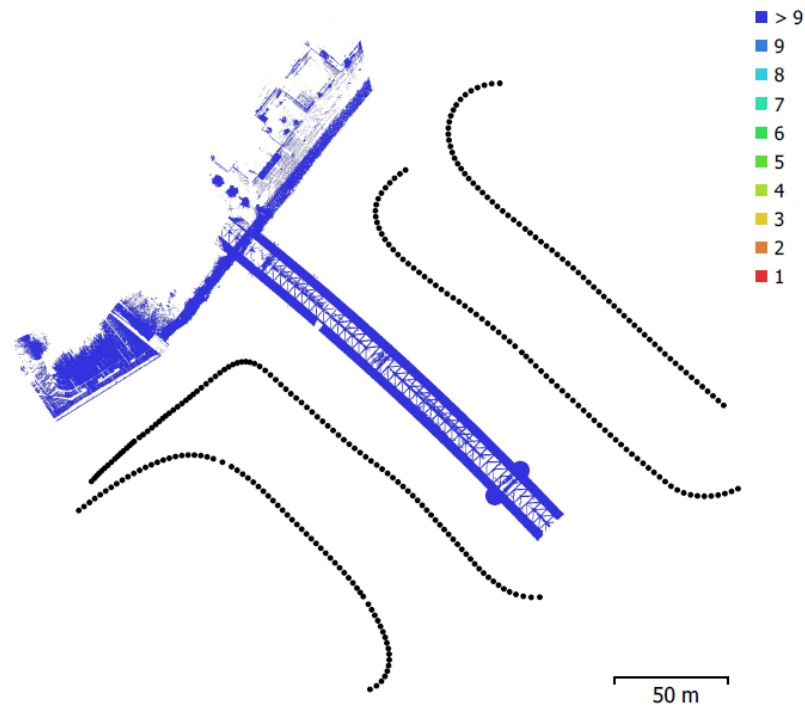


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	318	Camera stations:	318
Flying altitude:	95.6 m	Tie points:	197,553
Ground resolution:	2.26 cm/pix	Projections:	647,390
Coverage area:	4.57e+03 m ²	Reprojection error:	0.542 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
NIKON D7100 (16mm)	6000 x 4000	16 mm	4 x 4 μ m	Yes

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

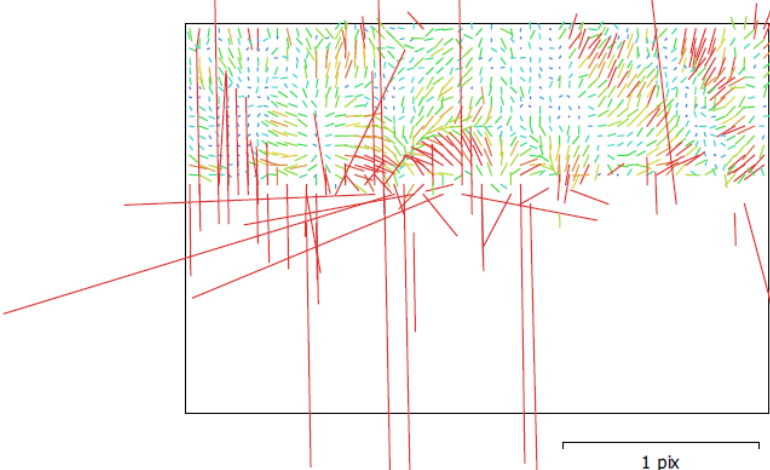


Fig. 2. Image residuals for NIKON D7100 (16mm).

NIKON D7100 (16mm)
318 images, precalibrated

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	6000 x 4000	16 mm	4 x 4 μm
F:	4234.07		
Cx:	-9.9812	B1:	0
Cy:	-0.0917723	B2:	0
K1:	-0.0827941	P1:	-0.00019865
K2:	0.0867524	P2:	-0.000138589
K3:	-0.0378465	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Camera Locations

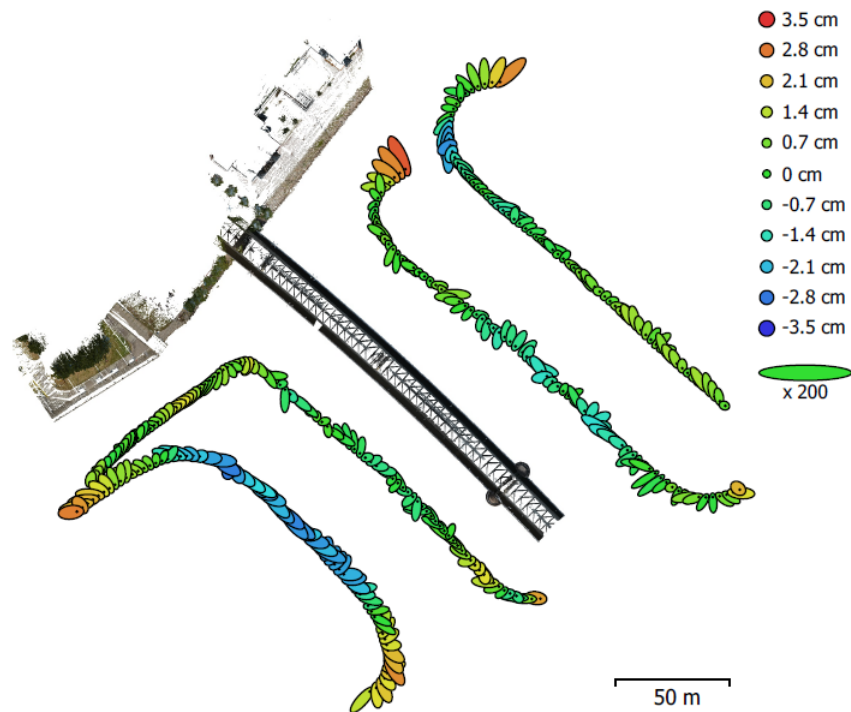


Fig. 3. Camera locations and error estimates.
 Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
2.12792	1.91356	1.21767	2.86177	3.11006

Table 2. Average camera location error.
 X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Camera Orientations

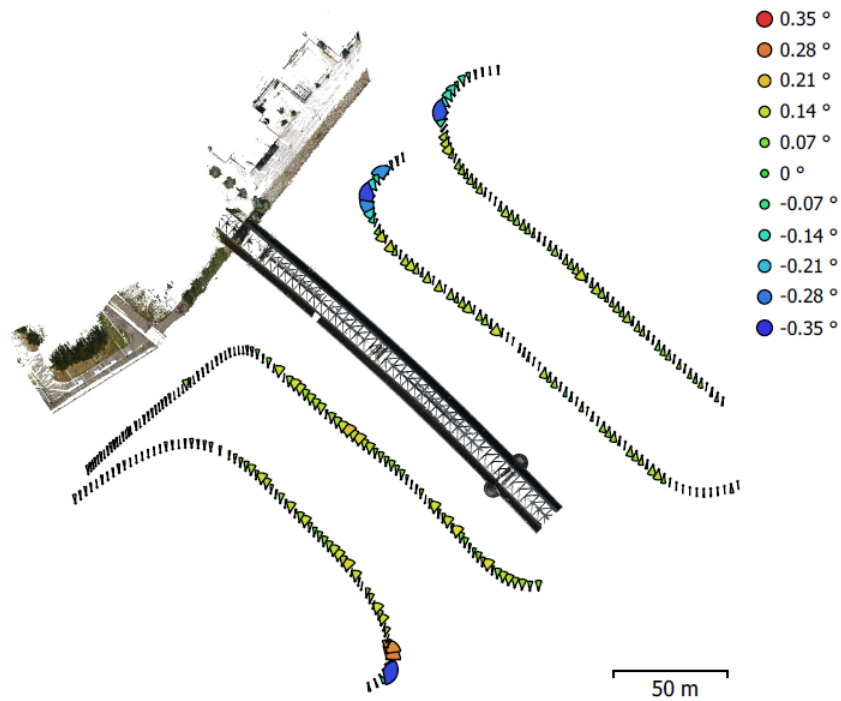


Fig. 4. Camera orientations and error estimates.
Arcs represent kappa error estimates.

Omega error (°)	Phi error (°)	Kappa error (°)	Total error (°)
0.0896015	0.0845535	0.0898449	0.152479

Table 3. Average camera rotation error.

Digital Elevation Model

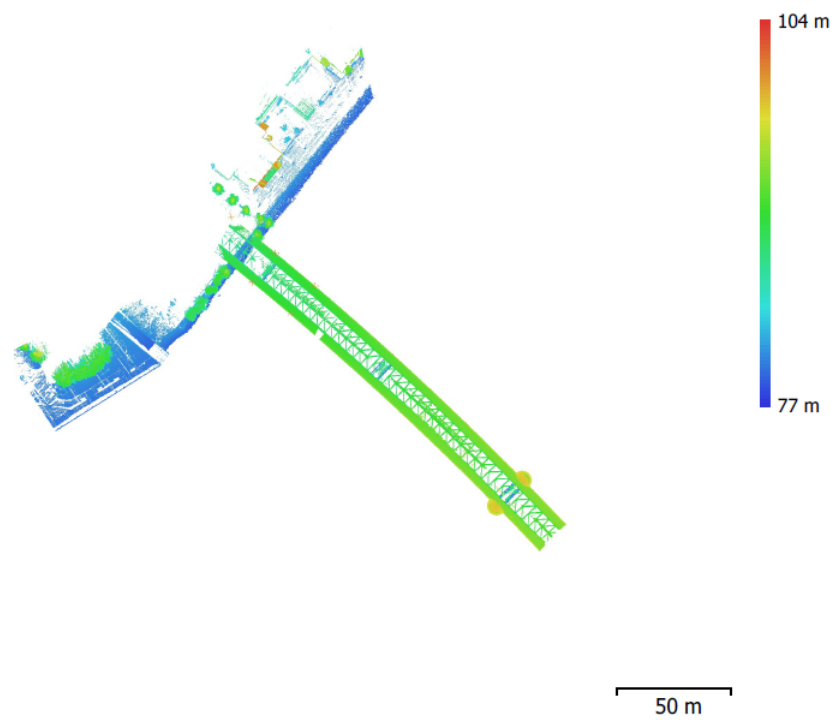


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: unknown
Point density: unknown

Processing Parameters

General

Cameras	318
Aligned cameras	318
Markers	10
Coordinate system	ETRS89 / GK26FIN (EPSG::3880)
Rotation angles	Omega, Phi, Kappa

Point Cloud

Points	197,553 of 386,540
RMS reprojection error	0.141979 (0.542136 pix)
Max reprojection error	0.456938 (21.4607 pix)
Mean key point size	3.26152 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	4.29781

Alignment parameters

Accuracy	Highest
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Yes
Key point limit	120,000
Tie point limit	12,000
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	7 hours 0 minutes
Alignment time	16 minutes 4 seconds

Dense Point Cloud

Points	13,824,407
Point colors	3 bands, uint8
Coordinate system	ETRS89 / GK26FIN (EPSG::3880)

Tiled Model

Texture	3 bands, uint8
---------	----------------

Reconstruction parameters

Source data	Dense cloud
Tile size	8192
Enable ghosting filter	Yes
Processing time	2 hours 34 minutes

Software

Version	1.4.4 build 6848
Platform	Windows 64